

摩擦学研究的进展与趋势

一、引言

摩擦学是一门与机械表面界面科学密切相关的学科，它主要研究相对运动表面之间的摩擦、磨损和润滑规律及其控制技术。它涉及传统机械加工、交通运输、航空航天、海洋、化工、生物工程等诸多工业领域。统计资料显示，摩擦消耗掉全世界约 1/3 的一次能源，磨损致使大约 60% 的机器零部件失效，而且 50% 以上的机械装备恶性事故都起源于润滑失效或过度磨损。欧美发达国家每年因摩擦、磨损造成的经济损失占其国民生产总值（GNP）的 2% ~ 7%，而在工业生产中应用摩擦学知识和研究成果可以节约的费用占 GNP 的 1.0% ~ 1.4%^[1]。我国已经成为制造大国，但远不是制造强国，在生产与制造过程中对资源和能源的浪费严重，单位国内生产总值（GDP）能耗约为日本的 8 倍，欧盟的 4 倍，世界平均水平的 2.2 倍，若按 GDP 的 5% 计算，2014 年我国摩擦、磨损造成的损失达 31800 亿元，因此，开发和应用先进摩擦与润滑技术实现能源与资源节约的潜力巨大。另外，机械产品中的摩擦界面除了起到传递运动和能量的作用，还可具备防腐、减阻、吸声等特殊功能，对机械系统的效率、精度、可靠性和寿命等性能具有重要的甚至是决定性的作用。摩擦学理论与技术可用于改善机械系统工作效率、延长使用寿命、减少事故发生，为解决人类社会面临能源短缺、资源枯竭、环境污染和健康问题提供有效的解决方案。

人类很早就生活在生产实践中应用摩擦与润滑技术，而对摩擦规律的科学探索也有数百年的历史^[2]。早在 15 世纪，意大利的列奥纳多·达·芬奇就开始对摩擦学理论进行探索，1785 年法国摩擦学及物理学家库仑提出干摩擦的机械啮合理论，英国的鲍登等人于 1950 年提出了黏着摩擦理论。关于润滑，英国人雷诺于 1886 年根据前人观察到的流体动压现象，总结出流体动压润滑的基本理论，其后相继发展出了边界润滑（1921 年）、

弹性流体动力润滑（1949年）和薄膜润滑（1990年）理论。鉴于摩擦、磨损与润滑的研究进展和在工业中的广泛应用及重要地位，1966年英国的 H. Peter Jost 首次提出“摩擦学”这一术语，将其定义为“研究相对运动表面间的摩擦、润滑和磨损，以及三者间相互关系的理论与应用的一门边缘学科”。对摩擦的研究主要是揭示摩擦力的起源及其能量耗散规律等基本的物理过程及机理。对材料磨损的研究旨在揭示材料去除机制以及影响因素，进而建立物理模型和数学描述，以及寻求润滑、表面处理等技术，以减少摩擦和控制磨损，对国民经济的发展具有重要意义。润滑是降低摩擦、减少或避免磨损的必要手段。研制和正确使用润滑剂和润滑技术是大幅度提高机械效率、保证机械长期可靠地工作、节约能源的最主要技术途径。为了生态环境的可持续发展，近年来摩擦学研究紧跟时代需要，以绿色、高效、多功能作为润滑技术的发展新方向。随着研究从宏观向微观领域的不断深入，表面效应和界面效应愈来愈突出，一方面为摩擦学基础理论和技术问题的突破提供了导向作用，另一方面又催生出更为宽广的一个新的研究领域——机械表面界面科学。

随着我国从制造大国向制造强国的发展目标迈进，摩擦学专门知识对相关技术的指导作用及其重要性愈加凸显。随着我国产业升级的发展，制造业、航空航天、地面交通运输、能源、海洋、生物与仿生等不同工业领域对摩擦学技术提出了大量的迫切需求。特别地，近年来，我国政府部门和科技界十分重视工业基础，即关键基础材料、核心基础零部件/元器件、先进基础工艺和产业技术基础（简称“四基”）等能力薄弱的问题。2014年1月，工业和信息化部向中国工程院发出“关于委托开展工业强基战略研究的函”，指出基础能力不强是制约工业由大变强的主要瓶颈。摩擦学基础理论和技术的研究与“四基”密切相关，比如轴承、齿轮、螺栓、密封件、刹车片等基础零部件虽然看似简单，但是对其摩擦学机理及材料和生产技术的研究匮乏，严重制约了我国高端装备的升级换代与性能提升。针对各行业对摩擦学需求的迅猛发展，本报告主要概述了近5年我国在摩擦、磨损与润滑基础理论研究以及在不同工业领域应用中取得的创新性和突破性研究进展，通过对国内外研究进展进行对比，对今后摩擦学基础理论和应用技术的研究趋势进行了展望。

二、近年最新研究进展

（一）摩擦学基础理论

1. 摩擦机理及控制

摩擦的起源与能量耗散机制及其控制一直是摩擦学基础研究的核心科学问题。黏着摩擦理论认为摩擦力来自表面间微观真实接触处的黏着点或表面膜的剪切应力，摩擦二项式中提出摩擦力由表面间机械作用和分子间作用力组成。从原子分子尺度来看，摩擦力主要与摩擦界面在滑动过程中存在的能量积累和突然释放的非稳态过程相关，非稳态过程导致原子振动并最终耗散为热。黏着和摩擦分别反映了接触界面发生相对运动时在法向和切向

遇到的抗力。法向黏着迟滞与切向摩擦能量耗散往往存在着耦合关系。材料的摩擦学行为是由摩擦副材料的跨尺度特性决定的，微观分子、原子尺度的接触和作用需要与宏观材料的力学特性结合，建立跨尺度多物理场模型，系统全面揭示宏观摩擦学现象与微观原子、分子尺度的表面界面作用的联系。微观界面的能量耗散最终导致了宏观摩擦中的热、力、光、电磁辐射等现象。很多关于摩擦机理的研究都是围绕不同尺度下的摩擦表面之间的基本行为和规律去展开的。

（1）原子尺度摩擦和固体超滑机理

摩擦总是直接发生在两固体表面之间的原子、分子间的直接接触与分离过程中。常见材料的摩擦通常伴随着磨损，导致固体表面的形貌异常变化，从而不容易开展分子原子量级的摩擦机理的研究。为了对摩擦机理进行深入探讨，人们尽量寻找一些原子级光滑的表面来进行研究，其中一些层状二维材料，如云母、石墨等是比较理想的选择。

二维层状材料是由二维材料（如单层石墨烯、 MoS_2 、h-BN 等）堆叠而成的材料体系，因其层间剪切强度低，可以作为良好的固体润滑材料。胡元中小组通过计算体系势能起伏和任意滑动路径上的滑动能垒，获得了层间剪切强度，分别研究了石墨烯、氧化石墨烯、氟化石墨烯、 MoS_2 层间摩擦机理。研究发现氧化石墨烯的静电吸引和氢键作用会导致较大的层间摩擦力，而理想氟化石墨烯（化学计量比 1:1）由于强电负性的氟原子之间具有的静电排斥作用，从理论上可以获得层间较小的摩擦力^[3]。此外，层间摩擦力并不取决于界面电荷密度的绝对值，而是取决于滑动过程中的电荷密度涨落。当界面电荷呈现摩尔纹形状分布时，滑动过程中电荷密度涨落显著降低，从而获得超滑状态^[4]。氟化非晶碳基薄膜在高真空条件下摩擦过程中通常表现为瞬间磨损失效，迄今为止，这种磨损失效的本质机制仍不清楚。王立平小组研究表明高真空条件下塑性变形引起的接触界面间强黏着是薄膜的主要失效机制。摩擦界面的 C—F 键和 C—C 键对周围的应力场分布和化学环境非常敏感，当施加应力或改变对偶材料的成键状态时，与摩擦密切相关的界面电荷分布发生明显改变，导致界面 C—F 键和 C—C 键的键长和键能发生相应变化，从而影响界面的稳定性和黏着相互作用^[5]。

清华大学郑泉水小组、魏飞小组在厘米级石墨片间和双壁碳纳米管管壁之间（卷曲的石墨烯层间）实现了超滑现象^[6]。在研究中，他们制备了超长碳纳米管并用 TiO_2 纳米颗粒进行标记和修饰，在光学显微镜和电子显微镜中分别进行了单根碳纳米管的操纵实验。在光学显微镜下，用气流吹动碳纳米管，发现在气流的作用下双臂碳纳米管的内层被拔出，气流减小后内层可以进行快速的回缩，这一实验结果预示了管壁之间可能存在超低的摩擦力。进而在扫描电镜中，利用纳米硅悬臂对双壁碳纳米管内外层间摩擦力进行了精确的测量，发现双壁碳纳米管内外层的层间摩擦力在纳米量级，摩擦力随着内层拔出长度没有明显改变，并计算了内外层间的剪切强度在帕斯卡量级。与碳管或者石墨烯之间的固体超滑类似，雒建斌小组将石墨烯涂到 SiO_2 小球，然后与高取向石墨（HOPG）对摩，实现了超滑（摩擦系数为 0.002），胡元中小组和张俊彦小组分别都对类金刚石固体薄膜的超滑

开展了理论和实验研究，丰富了对类金刚石剪切石墨化和表面钝化的超滑机理的理解。

（2）界面摩擦调控

摩擦现象无时无刻不存在于各种机械与人们日常生活中的相对运动表面之间。通常，在确定摩擦与润滑材料之后，经过磨合，人们能得到一个相对稳定的摩擦系数。要对摩擦力进行在线调控只能通过对法向载荷的调节来实现，而不能对摩擦系数进行调控。从材料学角度来看，界面摩擦性能与两个接触界面之间相互作用强度有关，因此可以通过多种方式控制两个接触界面之间相互作用强度，从而在一定程度上实现界面之间摩擦“主动”调控。目前国内的研究人员在这方面已开展不少研究。

清华大学的孟永钢、田煜等人对摩擦的电磁场主动调控开展了长期研究，主要使用外加电磁场强度控制微纳表面之间的电磁力作用强度，从而改变两相对运动表面之间的法向和切向力作用强度。此外，通过控制导电摩擦副表面的电势来控制带电基团在固体表面的吸附或脱附，从而改变固体表面的剪切强度，调控得到不同的边界润滑状态和摩擦系数^[7]。除了深入研究基于水基润滑的电控摩擦机理，还针对有机溶剂和离子液体体系，使用不同的离子液体（如 1-辛基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐（[OMIM]BF₄）、1-辛基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐（[OMIM]PF₆）和 1-癸基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐（[DMIm]PF₆），溶解在碳酸丙烯酯中，对钢材质的球-盘摩擦主动控制开展了研究，得到了电势依赖的摩擦磨损行为，并可通过吸附的离子种类和表面浓度来解释相关现象^[8]。

中国科学院兰州化学物理研究所的周峰等人通过对固体表面修饰或无机/有机复合将一些响应性官能团引入固体表面或基体之中构筑各种响应性表面，通过施加外界刺激来改变固-液界面水化程度、微观形貌、化学组成、界面电荷等，实现固体表面润湿、黏附和摩擦的调控。通过将离子型单体接枝到固体表面，改变其亲疏水性实现了固-固界面摩擦电解质调控，摩擦系数可以从极低（~0.001）到极高（~1）连续调控^[9]。将温度敏感单体（如 N-异丙基丙烯酰胺）、酸碱敏感单体（含羧基、氨基官能团等）引入固体表面（或聚合物基体中），通过改变外界温度或环境 pH 值来改变特征官能团的水化程度从而实现摩擦系数的温度和酸碱度调控。通过改变接枝聚合物（或凝胶表面）在不同溶剂中的溶胀程度，或多元聚合物在不同溶剂之中重组可以实现固体表面溶剂调控^[10]。据此原理，将两种或多种响应聚合物单体引入聚合物基体之中可以实现双刺激或多刺激敏感表面，实现了摩擦系数的多重调控^[11]。

通过外界刺激来改变界面摩擦系数，使得人们在不接触界面前提下可依据人的意志来改变界面的润滑性能。这些摩擦可控的界面在智能机械系统中有广阔的应用前景。

（3）微纳结构的黏/脱附控制机理

当固体结构尺寸减小到微纳米尺度，尺寸越小，表面力对微纳结构的黏附与摩擦行为的影响越大。随着纳米技术与纳米制造的发展，纳米摩擦学在微纳机电系统以及生物与仿生技术中的作用越来越大。除了人们通过现代纳米制造技术制造微纳米结构外，研究发现自然界的壁虎、蚂蚁、蜜蜂、苍蝇、蜘蛛和蜥蜴等动物或昆虫的强黏附和摩擦的控制能力

与它们足部的微纳米尺度的刚毛结构密切相关。与通常机械加工得到的粗糙表面可用球形或者椭球等来近似描述微观的粗糙峰形状不同,在扫描电镜下观察壁虎脚趾刚毛的微观结构发现其末端是纳米量级的铲状薄板结构。传统接触模型考虑的多为常见加工表面的粗糙度,发展了考虑球/平面接触的 Johnson-Kendall-Roberts (简称 JKR) 等模型,在这些模型中主要考虑了不同表面之间作用势的分布情况,预测了脱附黏着力的大小,该力在不同分离方向上是各向同性的。传统球/平面的接触模型不能解释生物体刚毛这样的各向异性微纳结构的易脱附行为。

清华大学的田煜与国外合作,提出了同时考虑摩擦力和黏着力的薄板剥离模型^[12]:接触区域范德华力产生摩擦力,剥离区范德华力产生黏着力。壁虎通过脚趾卷入和卷出宏观动作,和刚毛自身的弯曲结构,可调节对刚毛末端的铲状薄板结构的剥离角度。脚趾卷入时对应小剥离角度和强黏着与摩擦,卷出时大剥离角度对应弱黏着与摩擦,从而可改变摩擦力和黏着力三个数量级以上,实现强黏附和易脱附。这种分区域考虑微观黏着与摩擦的模型也适用于其他微纳米结构的摩擦学行为的分析。根据黏着的剥离区域模型,提出了通过调节表面背部基底刚度、倾斜微柱几何与力学参数去优化强黏附、易脱附性能的方法,制备了末端带薄板结构的仿生表面,具有与天然壁虎刚毛类似的黏着与摩擦的各向异性,并研制了可对平面结构进行垂直抓持与释放的夹持器原型^[13, 14]。这些研究有助于深入理解微纳米结构的黏着与摩擦来源及其耦合规律,并展示控制和利用微纳结构与表面间的范德华力产生的黏着力的方法。

2. 材料磨损

对材料磨损的研究旨在揭示摩擦过程中的材料去除机制,以及寻求润滑和表面处理技术控制摩擦和减少磨损。它对于国民经济的发展具有重要意义,不仅能够通过减摩降噪为国家节约资源和能源,同时可为我国高端制造业的发展奠定技术基础。本小节着重介绍近 5 年我国在材料磨损基础研究领域取得的重要进展,主要包括化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 中的磨损、微观磨损、复合微动磨损、碳基薄膜磨损和载流磨损 5 个方面。

(1) CMP 抛光中的磨损

CMP 是超大规模集成电路制造的关键工艺步骤之一,是同时实现晶圆局部及全局平坦化的唯一手段。一直以来,超精密加工过程中产生的摩擦和磨损现象属于摩擦学研究领域,同样,CMP 过程中的材料去除机理也需要用摩擦与磨损理论解释。CMP 受化学作用、机械作用、热效应等各种因素的影响,过程极为复杂,到目前为止材料去除机理尚不完全清楚。因此,对 CMP 过程中的摩擦、磨损与润滑现象进行研究,是揭示材料去除机理的基础,也是提升 CMP 效率和质量的关键。

清华大学雒建斌、路新春团队针对集成电路铜互连布线和新型阻挡层的 CMP 过程中的润滑状态、摩擦化学行为和化学机械协同作用下的材料去除机理等关键问题开展了系统研究,并取得了一定进展,具体包括:①研制出 CMP 过程中纳米颗粒运动观测系统^[15],

以及 300mm 晶圆 CMP 装备流体润滑状态与晶圆状态的在线测量系统，探讨了流体承载与润滑机制。研究发现，在常规压力下晶圆 - 抛光垫的接触面处于混合润滑状态，且接触承载起主导作用；而下压力低至 0.3psi 后，流体承载起主要作用^[16]。②提出了纳米颗粒与表面的作用机制。③基于腐蚀磨损机理，提出了 CMP 材料去除的数学模型。该模型中，材料去除速率与晶圆 / 抛光垫的相对线速度、有效颗粒个数成正比；材料去除率随着抛光压力的增大呈非线性增长；当磨粒半径远大于晶圆表面钝化膜厚度时，材料去除率随着颗粒半径的增大而减小。该模型预测了 CMP 过程中的大部分变量，并清晰地分析了机械参数对 CMP 材料去除机制的影响^[17]。④从摩擦化学的角度研究了铜在双氧水抛光液中的材料去除机理。研究发现，材料去除的主导因素随 pH 值的变化而不同：pH 值为 4.0 ~ 6.0 时，腐蚀促进磨损是材料去除的主导因素；pH 值为 8.0 ~ 9.0 时，磨损促进腐蚀起主导作用；pH 值为 3.0 和 10.0 时，化学腐蚀则成为主导^[18]。⑤研究了新型阻挡层钉在 CMP 过程中的摩擦化学行为。在以高碘酸钾为氧化剂阻挡层抛光液中，抛光过程表面钝化膜的去除和再生，以及抛光过程液体流动影响电化学反应的传质过程对钉的化学 / 电化学腐蚀有明显的促进作用^[19]。⑥制备了粗糙度 Ra 为 0.041 nm 的超光滑表面。

（2）微观磨损

纳米制造科学是支撑纳米科技走向应用的基础。典型的纳米制造技术包括纳米切削、纳米抛光、纳米压印和纳米铸造等，均涉及大量的微观磨损问题。此外，由于表面和尺寸效应的影响，微观磨损已成为微 / 纳机电系统长期可靠服役的巨大障碍。因此，微观磨损不仅是微 / 纳机电系统应用中的关键问题，更已成为纳米制造的共性基础问题^[20]。

西南交通大学的钱林茂针对单晶硅的微观磨损问题开展了系统的研究^[20-24]。具体进展包括：①研制了多环境和多功能的微观磨损实验平台。以原子力显微镜为基础平台，通过对针尖支架和液池系统的改进以及外接环境气氛控制系统的搭建，实现了不同气液环境中的微观摩擦磨损实验。②研究了实验条件、环境工况等对单晶硅微观磨损的影响规律^[21-23]。单晶硅表面越亲水，摩擦化学磨损越严重。滑动速度的增加会减弱单晶硅的摩擦化学磨损，当速度足够大时，单晶硅在低湿度（< 30%RH）下表现为无损伤。③初步揭示了单晶硅的摩擦化学磨损机制^[22, 23]。单晶硅的摩擦化学磨损是化学反应和机械作用共同作用的结果^[24]。仅当环境中存在水分且摩擦副具有较强的化学活性时，单晶硅的摩擦化学磨损才有可能发生。④实现了单晶硅表面的原子层状去除。磨损区域断面的高分辨透射电镜分析显示单晶硅在摩擦化学磨损后仍保持完整的晶体结构^[24]。在此基础上，通过面扫描的方式在单晶硅表面实现了单层或多层原子层状去除。相关研究结果对单晶硅的超光滑表面抛光有重要的指导意义。

（3）复合微动磨损

微动是发生在紧配合面上的微小幅度的运动，已成为重大装备灾难性事故的主要原因之一。而复合微动是两种及以上微动模式的耦合。例如，扭转复合微动是扭动与转动微动耦合的复杂微动^[25, 26]，它广泛存在于球阀、滚珠轴承、杵臼关节、球窝接头及其他旋转

紧固件中,常常是导致该类零部件失效的元凶。复合微动的提出,极大地拓宽了微动摩擦学的研究领域,为减缓实际的复杂微动损伤提供了重要的理论指导。

周仲荣、朱旻昊团队提出了复合微动概念,并开展了系统研究^[25-28]。具体进展包括:①研制了一系列微动磨损、疲劳试验装置。研制了包括扭动、转动和扭转复合微动磨损,以及弯曲和拉扭微动疲劳的试验装置,为研究微动损伤机理提供了条件和手段。②揭示了不同材料复合微动的运行行为和损伤机理^[26, 28]。开展了 LZ50 中碳钢、7075 铝合金、PMMA 等材料的扭转复合微动磨损试验,研究表明倾斜角度、角位移幅值、循环次数和材料性质等对扭转复合微动的运行和损伤行为有重要影响。发现利用摩擦振动/噪声信号分析可成功鉴定出微动与滑动的范围。③探索了复合微动磨损条件下的疲劳裂纹萌生和扩展行为^[27, 28]。探讨了扭转复合微动局部接触疲劳和磨损间的竞争机制,提出疲劳裂纹的形成与接触区局部隆起密切相关。④揭示了油/水流体等介质对扭转复合微动磨损特性的影响^[28]。建立了磨损体积与累积耗散能的关系,评价了不同抗微动减缓措施对抵抗扭转复合微动的影响。

(4) 碳基薄膜磨损

碳基薄膜具有高硬度、高弹性、低摩擦系数和低磨损率等优异的综合特性,同时其还兼有制备方法简单、易于大规模生产和沉积温度较低等优点,在航空、汽车机电等领域获得广泛应用。采用纳米多元化、复合等涂层技术对其组成结构主动设计,研制低摩擦、高承载、高弹性、多环境适应性的碳基薄膜已成为润滑薄膜技术发展的主要方向。

中国科学院兰州化学物理研究所张俊彦和清华大学邵天敏等研究组对碳基薄膜的制备及其摩擦磨损行为、机理进行了大量研究^[29-32]。具体进展包括:①研制出了具有类富勒烯结构含氢碳膜^[29]。采用 PECVD 沉积系统实现了类富勒烯结构含氢碳膜的可控制备,并采用显微拉曼技术分析薄膜产生超低摩擦的原因。②研制了具有强韧化、低摩擦特性以及低环境敏感性集一体的碳基多元复合薄膜^[30]。采用多靶磁控溅射薄膜沉积技术,首次系统性地制备了元素周期表中 9 种强碳与弱碳金属 Al 共掺杂的碳基多元复合薄膜体系。③制备了一种具有双重纳米结构的非晶碳薄膜材料^[31]。该种薄膜材料具有极为优异的弹性回复性能,并且在真空条件下具有非常良好的减摩抗磨性能,摩擦系数低于 0.001。④阐释了无定型碳薄膜的超低摩擦现象^[32]。提出摩擦界面上形成的转移膜中类石墨层状结构的聚集是无定型碳膜产生超低摩擦的原因。这些基础性的研究工作丰富了对碳基薄膜摩擦磨损机制的认识,对制备一定结构和用途的涂层具有借鉴和指导意义。

(5) 载流磨损

随着科学技术的快速发展,载流摩擦副选材设计面临严峻的挑战,表现在两个方面:服役条件的极度苛刻化和载流与摩擦的高可靠性要求^[33-35]。对于高铁弓网系统,摩擦线速度达 100m/s、摩擦接触区电流密度超过 2A/mm²,对于电力高压开关的工作电压从 100kV 快速提升到 500 ~ 1000kV。为保证持续的动力供给,高速列车弓网系统的离线率要求小于 5% 以下。在轨道交通、电力行业等领域,材料载流摩擦磨损性能不足已成为关

键技术瓶颈。

河南科技大学张永振团队在材料载流摩擦学特性方面开展了系统的研究工作^[34-35]。具体进展包括：①研制了载流摩擦试验平台。实现了载流与摩擦的条件耦合、摩擦学性能与导电性能的同步检测，可模拟高铁弓网振动与高压开关的刚性接触。②初步揭示了载流特性与摩擦特性的基本规律，发现导电与摩擦的共面接触是载流 / 摩擦耦合的本质原因，摩擦性能与载流性能波动趋势与时间上表现为动态一致。③初步探索了电弧损伤的物理机制。电弧对材料的热损伤、熔化甚至汽化是材料损伤的主要途径。电弧损伤后的表面氧化膜是导致导电性能降低的主要原因。④载流摩擦材料的研制。采用能够在接触表面持续形成一层具有导电 / 润滑功能表面膜的材料，能够大幅度提升材料的导电性能与摩擦性能。

3. 润滑理论与技术

润滑的目的主要在于利用润滑剂避免两固体摩擦表面的直接接触，以达到减小摩擦和降低磨损的目的。常用润滑剂有液体润滑剂（水、矿物油和合成润滑油等）、固体润滑剂（石墨、二硫化钼、滑石粉、高分子聚合物等）、润滑脂和气体润滑剂。在实际应用中，液体润滑最常用，与固体润滑相比具有较长的忍耐性，低的机械噪声，良好的导热性，在弹性流体动压润滑状态下具有较低的摩擦等。

根据摩擦学中经典的 Stribeck 曲线，润滑可分为四种状态，流体润滑（包括弹性流体动压润滑）、薄膜润滑、混合润滑、边界润滑。流体润滑典型膜厚在 1 ~ 100nm，摩擦表面上完全被连续的润滑膜所分开，低摩擦的润滑膜承受载荷；弹流润滑是在高副接触下，考虑摩擦副变形、润滑液黏压效应等的流体润滑，膜厚有数十纳米到几个微米。薄膜润滑是考虑摩擦副表面的物理化学性能、膜厚对润滑剂分子行为影响的润滑状态，典型润滑膜厚在 20 ~ 300nm；混合润滑的法向载荷由固体之间的直接接触和部分弹流动压共同承受；边界润滑中主要载荷几乎全部通过微凸体以及润滑剂和表面之间相互作用所生成的边界润滑膜来承担，通常膜厚为 1 ~ 2 个分子层。对各种润滑形式及其机理的研究及润滑新材料与技术的研究是润滑研究的主要内容。

（1）液体超滑

清华大学雒建斌、张晨辉小组在液体超滑方面开展了大量实验研究，并在基于磷酸体系的超滑规律和机理^[36]、生物液体超滑的规律和机理^[37]、基于酸与多羟基醇混合溶液超滑的规律和机理^[38]等方面取得了一定的成果。

发现了磷酸溶液的超滑特性，它能够实现 0.004 的超低摩擦系数^[36]。分析了超滑的磨合过程和磨合机理，并将超滑的磨合过程划分为 2 个阶段。对第一阶段而言，它是磷酸实现超滑的必要条件，其磨合机理与溶液中的氢离子密切相关。提出了氢离子润滑模型，即磨合过程中的氢离子与摩擦副表面发生摩擦化学反应（表面质子化）使表面带正电荷，这是摩擦系数减小的主要原因。对第二阶段而言，它不是磷酸实现超滑的必要条件，其磨合过程主要与自由水的挥发有关。并建立了磷酸超滑的润滑模型。通过对磷酸超滑过程中的接触区形态的分析和摩擦副表面的分析，提出了一种 3 层结构的超滑模型，即 stern 层、

具有氢键网络结构的磷酸吸附膜和自由水分子层。

发现了莼菜黏液的超滑特性^[37]。结果表明莼菜黏液与玻璃表面之间的摩擦系数为 0.005。通过进一步实验,发现超滑与黏液的分子结构和黏液中的水分子密切相关。微观结构分析表明黏液是一种含有很多纳米薄片结构的多糖凝胶。其超滑的机理归因于在这些聚合物薄片之间形成了流动性很好的水合层。同时,通过对钛合金表面的有机膦酸涂层改性,发现了生物材料膦酸聚合物分子的超滑特性,该涂层不仅能够有效降低摩擦系数至超滑量级(0.004),而且能够大幅度减少自身及对偶摩擦副的磨损。

发现了酸和甘油混合溶液的超滑特性^[38]。超滑与甘油溶液的浓度和酸溶液的 pH 值密切相关,只有当甘油溶液的浓度 $\leq 40\%$ 且酸溶液的 $\text{pH} \leq 1$ 时,超滑才可以实现,但是超滑与酸溶液的种类无关。通过进一步研究,发现了酸和多羟基醇混合溶液的超滑特性。其超滑的机理和磷酸溶液的超滑机理以及酸和甘油混合溶液的超滑机理是一致的。实验还发现多羟基醇溶液和酸溶液混合后能够实现超滑的条件是:多羟基醇分子上羟基数大于等于 2 个,而分子上碳原子个数 (< 10) 以及羟基在碳链上的位置对超滑没有影响。2015 年,他们在特定条件下,在润滑油中实现了超滑,摩擦系数达 0.004。

清华大学马丽然与以色列 Klein 教授合作,对水合超滑的微观行为机制进行研究,获得了 0.0002 的摩擦系数,发现在不同载荷下,盐溶液超滑具有不同的能量耗散形式,并通过水合层剪切规律测得盐离子水合层黏度,该黏度约为体相水黏度的 250 倍^[39]。

(2) 热弹流润滑理论

弹性流体动压润滑(简称弹流润滑, EHL)广泛存在于诸如轴承及齿轮等高副接触的机械零部件中。其油膜的建立不仅依靠流体动压效应,更重要的是来自高压下的表面弹性变形及润滑油黏压特性。由于弹流模型的高度复杂,其研究工作极具挑战。自 20 世纪 50 年代开始,众多学者开发了先进的分析方法和有效的实验手段,针对弹流润滑进行了深入而广泛的研究。以多重网格法为代表的一系列高效算法的提出,使得在宽广的速度和载荷范围内高效求解稳态和时变弹流问题成为可能。朱东、胡元中等人通过确定性混合弹流润滑模型的建立、弹流润滑的计算由全膜状态拓展到定量的部分粗糙接触及干接触。随着数字化图像技术的发展,光干涉油膜测量的分辨率和测量范围都得到提高,可对不同工况下的弹流油膜进行测量,如混合弹流润滑及时变效应的测量。迄今为止,弹流润滑的一般基础理论体系已比较完善,因此在研究中,可充分考虑热效应、非牛顿效应、微观形貌效应及动态效应。近些年,弹流润滑研究转向某些特殊的成膜机理。当这些因素成为主导,普通的弹流润滑理论不再适用,如热黏度楔产生的中央油膜凹陷及膜厚随载荷的增加^[40]、界面滑移导致的中央油膜下凸。

现在弹流润滑面临的主要挑战在于真实的而非虚拟的工业问题的研究,这些问题的研究并非已有弹流理论的参数化分析,而是润滑学与表界面力学、物理化学的交叉,其输出不仅是润滑膜厚,还应包括摩擦、磨损与功耗。在这一方面已取得了进展,如轴承润滑中润滑剂的分布与弹流润滑的分析;弹流中真实流变行为的研究与 Stribeck 摩擦曲线的计算。

面对工业问题，弹流润滑有很大的发展空间，面临的挑战也非常巨大，如混合弹流润滑中磨损的确定性模型与计算、固液复合润滑中的弹流机制、基于非光学的工程弹流膜厚测量等。

（3）新型润滑材料

第一，液体润滑剂及添加剂。

在很多摩擦系统中都使用液体润滑剂用以润滑、冷却和密封机械，液体润滑剂通常有矿物润滑油、合成润滑油和水基液体。在润滑油、脂中加入少量添加剂，能改善润滑油、脂的使用性能，改善程度与基础油的品质有关。添加剂通常用以影响润滑油的物理和化学性质，如各种降凝剂、黏度指数改进剂、消泡剂和各种抗氧化剂、抗腐剂、清淨剂、油性剂和极压抗磨剂等。针对不同的工况环境需要应用不同的润滑基础液和添加剂。

一是离子液体润滑剂：与传统润滑剂相比，离子液体具有更好的减摩抗磨能力，但合成步骤复杂、成本昂贵、对基底具有腐蚀性以及与基础油相溶性差，从而限制了它的实际应用。为解决以上问题，中国科学院兰州化学物理研究所刘维民等人制备了一系列离子液体，旨在降低成本、提高在基础油中的溶解性以及解决其氧化腐蚀性。①“原位”离子液体：将一些 IA 族金属元素的无机盐与功能有机分子在基础油、脂中复配，在基础油、脂中“原位”合成了具有减摩抗磨性能的离子液体润滑添加剂^[41, 42]。这在降低离子液体润滑剂成本、提高其在基础油中的溶解性以及解决其腐蚀性问题等方面有了重大突破。②抗氧化防腐离子液体：把具有特定功能的官能团位阻酚、苯并三氮唑等引入离子液体分子结构中制备抗氧化防腐功能离子液体，设计制备出具有抗氧化和防腐的离子液体润滑剂，作为润滑油和润滑脂的添加剂具有较好的抗氧化防腐性能^[43, 44]。减少离子液体的腐蚀和氧化，还有另外两个比较合理的方法：①将其用作添加剂，特别是润滑脂的添加剂，稠化剂的存在可以最大限度地降低腐蚀和氧化，防止外界环境的影响。②离子液体润滑剂的腐蚀主要由于含氟阴离子造成，用疏水或无卤素阴离子取代含卤阴离子，例如 $(C_2F_5)_3PF_3$ 变为 PF_6^- ，阴离子为长链磷酸酯、螯合硼酸根等，可降低或消除对基底的腐蚀。③绿色离子液体润滑剂：具有优异的水解稳定性、对金属基底无腐蚀性且表现出优异的润滑效果；原料易得、工艺简单、成本远远低于传统离子液体；其阴阳离子均具有一定的生物相容性、低毒性，是易生物降解的环境友好型绿色润滑剂^[45, 46]。

二是纳米颗粒添加剂：纳米材料由于其独特的物理化学性能，被广泛应用于生物、能源和新材料等领域。同时，也被用作润滑油添加剂，研究者对其润滑机理开展了大量的研究工作^[47, 48]。其中，纳米金属由于其自修复性能一直是人们研究的热点，纳米金属铜更是被成功应用于发动机油添加剂，表现出良好的减摩抗磨性能。近来，各种纳米富勒烯材料由于其独特的层状结构成为添加剂领域的研究热点之一，并表现出良好的摩擦学性能且符合环保要求^[49]。刘维民等人通过简单有效的方法由蜡烛燃烧制备了绿色、环保洋葱状碳纳米材料，其作为水和润滑油添加剂都具有较好的摩擦学性能，并探讨了其作为高效润

滑添加剂的润滑机理^[50]。雒建斌团队发现单层 MoS₂ 添加在润滑油中，可以大幅提高摩擦副的抗挤压能力，并成数量级地降低磨损率^[51]。

三是新型半固体润滑剂：①导电润滑脂：随着现代工业的发展，过去很长一段时期沿用的蓖麻油加二硫化钼作为导电用脂已经无法满足工业发展的要求，亟待发展一种新的导电润滑脂。王立平等人以咪唑类离子液体为基础油，聚四氟乙烯为稠化剂制备了新型的导电润滑脂。与添加贵金属的导电润滑脂相比，离子液体润滑脂的电导率均匀稳定。并且离子液体润滑脂具有较低的摩擦系数和较高的承载能力^[52, 53]。②凝胶润滑剂：刘维民等人制备了离子液体凝胶润滑剂和润滑油凝胶润滑剂，其除了具有较好的抗腐蚀和抗氧化性能外，还具有优异的摩擦学性能^[54]。重要的是，这种类型的润滑材料，具备很好的热可逆性及触变性能，在达到一定的温度或者剪切作用的影响下，能够迅速地从凝胶态转变为液态，当外力作用消失或者温度降低后，又能够快速地为凝胶态。通过这种方式，就能够有效地解决润滑油的爬移、蒸发损失或者泄露等缺陷，同时在一些特定的条件下，也能够作为润滑脂的替代品。

第二，固体润滑。

一是固体自润滑复合材料：聚合物基复合材料已经成为重要的固体润滑材料，相关研究主要集中在对聚合物材料进行物理化学改性和纳米、微米填料改性以提高复合材料的摩擦、磨损性能和力学性能^[55]。金属基高温自润滑材料是以高强度、耐高温的金属（或合金）为基体，以高温固体润滑剂为添加相；或者以不同的金属组成合金并进行调整和优化，使合金在摩擦过程中发生反应形成具有减摩抗磨作用的氧化物或无机含氧酸盐润滑膜。虽然金属材料与金属间化合物通过添加高温润滑相可以获得较好的高温摩擦学性能，但高温下长时间使用其自身的强度会明显降低且耐热性变差，严重限制了应用。陶瓷材料因高温强度高、高硬度、耐磨及抗化学腐蚀等优异性能而受到普遍关注，并已在很多工业领域获得日益广泛的应用。

我国科研人员努力探索研制出的一些新型聚合物密封材料和部件，其性能已达到或接近国外同等材料的技术水平，在我国新型发动机的研制任务中起到了保障作用。例如中国科学院兰州化学物理研究所王齐华课题组成功地将基于热固性聚酰亚胺和聚四氟乙烯纤维织物自润滑复合材料分别应用于发动机耐高温组合式蓄能密封圈和高速塑料动密封组件，并在聚合物自润滑材料的摩擦学基础研究领域积累了初步的研究经验和数据^[56]。航空航天、国防及其他高端装备领域的发展对高温耐磨材料和自润滑技术提出越来越高的要求，近年许多国家致力于发展高能效和高推重比的先进战机。材料对于温度通常最敏感，高温时材料的很多性能都将变化，解决高温下材料的磨损问题具有极大的挑战，目前中国科学院兰州化学物理研究所杨军等人发展了一种在宽温域（室温到 1000℃）范围内均具有优异摩擦学性能的高温自润滑材料，并对材料的设计、制备、组织结构、力学与摩擦学性能进行研究以及相关的应用开发；探索了相关摩擦学和材料学的基础科学问题，解决高温服役条件下的润滑及抗磨损问题，发展先进的耐高温润滑抗磨损材料与技术；所研制的材料

在先进军用发动机和轨道交通领域已经开始应用^[57]。

二是固体润滑涂层：通过在涂层中掺杂其他元素形成纳米复合结构，从而优化涂层综合性能，显著提高耐磨寿命。例如锆、钨、钒、铌、铬、钼、钨、钛、铝和硅等元素已掺杂到 CN_x 膜中，从而增强综合性能。一些多组分涂层，例如 Ti-B-N、Ti-Si-C-N、Ti-Al-B-N 和 $(Ti-Al-Cr-Si-V)_xN_y$ ，不但具有较高的硬度和强度，还具有耐磨、耐蚀、耐氧化和高的热稳定^[58]。邵天敏团队为了进一步提高涂层的硬度、韧性、耐腐蚀、耐磨损和减摩抗磨性能等，发展了多层涂层并结合软、硬材料的优点，例如 TiN/CrN 和 TiAlCrN/TiAl-1YN 超光滑涂层具有很好的抗磨性能^[59]。

DLC 薄膜在汽车工业、机械、电子、生物等领域有着十分诱人的应用前景。但是在其研究过程中也存在一些问题，内应力高、膜基结合弱；韧性低、脆性强以及热稳定性差，摩擦学行为受环境影响很大，这些问题仍然是制约着其可靠性和寿命的关键瓶颈。为了解决这些问题，类金刚石碳基薄膜的研究向着纳米化、多元组分、梯度多层、超晶格、微/纳织构化、多相复合以及自适应智能化等方向发展^[60]。这些方面的研究工作丰富和拓展了非晶碳薄膜研究和应用领域。

第三，固-液复合润滑。

固-液复合润滑体系利用表面涂覆、聚合和组装等方法将液体润滑油及对应脂复合在固体润滑薄膜表面，形成固体-油/脂复合润滑薄膜材料，既能保持固体润滑挥发低、承载能力高、耐腐蚀等优点，也能突显液体润滑剂自我修补性强、机械噪声小、对环境因素不敏感等特色，能够克服单一固体润滑或液体润滑各自的局限性，并使两者实现优势互补，从而大幅度提高摩擦副的减摩和耐磨性能，延长其使用寿命^[61, 62]。基于空间环境的特殊性要求所采用的润滑材料与技术具有高可靠性和超长寿命，目前所采用的各种润滑技术方案仍难以满足高效率、长寿命、高可靠性的空间技术的发展要求，国内也初步开展模拟空间环境固-液复合润滑薄膜材料研究^[63, 64]。

（4）新型润滑表面设计

研究表明，在材料表面制备一定的微结构可显著改善其摩擦磨损性能，在低速、高载条件下有助于从边界润滑向流体润滑的转变。与未织构化的表面相比，在边界润滑条件下微结构化的表面也具有更低的摩擦系数。并且微坑或微槽的形貌（例如大小、深度、方向、密度等）对材料的摩擦学性能有很大的影响^[65]。研究发现其中宽、深坑状织构在滑动和旋转摩擦的条件下，有利于减摩抗磨^[66]。表面织构技术在提高轴承承载能力、降低摩擦、减小磨粒磨损、延长工件的使用寿命等方面表现出了很大的潜力，并已经成功应用于密封环和推力轴承等实际零部件中，以提高其承载能力和抗卡咬能力。

4. 摩擦学测试技术

现代科学的发展历程表明，科学仪器的创新既是科技创新的组成部分，也是推动科技创新的重要支撑。近年来，我国摩擦学研究领域中测试技术与装备主要在润滑薄膜厚度检测以及摩擦和磨损实验设备等方面取得了一些重要进展。

（1）纳米级润滑油膜测试设备

许多低速、重载、高温和低黏度润滑介质的机械设备以及许多高超精密机械的摩擦副常处于几到几十纳米厚的润滑状态下工作。对这种状态下润滑膜特性的研究，需要高分辨率的测试方法。过去人们常用光干涉法，由于分辨率比较低（100 nm）而淘汰。近20年基本上由三种典型的测量方法主导，即垫层白光干涉法（英国帝国理工 Spikes 小组）、光干涉相对光强法（锥建斌、黄平、温诗铸等）和三束光干涉法（捷克 Hartl）。其中，清华大学锥建斌小组近期开发出高速摩擦润滑测试系统，可实现最高线速度 100 m/s 下的摩擦力测试（摩擦系数分辨率：0.002）以及最高线速度 42 m/s 下的润滑膜厚精确测量^[67]；将拉曼光谱技术和膜厚测试仪相结合，利用偏振拉曼光谱峰强随激光偏振态变化的规律可以实现接触区润滑膜分子排列的在线观测^[68]。

（2）极端工况摩擦磨损实验设备

材料表面及薄膜性能检测设备的多功能化、智能化、小型化、集成化以及高稳定性和高可靠性，也是现代分析测试技术发展的必然趋势。因此，市场及研究机构不断研发各种表面性能检测设备，特别是极端条件下的摩擦磨损设备：超高温（1000℃以上）摩擦磨损试验机、超低温（-160℃以下）摩擦试验机、超高真空（优于 10^{-7} Pa）摩擦磨损试验机、超高压摩擦磨损试验机、重载摩擦磨损试验机、苛刻环境（盐雾、沙尘、酸腐蚀、泥浆、空蚀、冲蚀、噪声等恶劣环境）摩擦测试仪器。

兰州华汇仪器科技有限公司结合中国科学院固体润滑国家重点实验室、清华大学摩擦学国家重点实验室在摩擦学领域的先进测量技术，研发了多种试验设备和极端条件下的检测设备。其中，MFT-4000 多功能材料表面性能试验机实现了在一台仪器上对材料表面硬度检测、结合力检测、摩擦性能和耐磨强度检测、粗糙度检测、弹性模量检测、厚度检测等多项机械性能的检测；MFT-R4000 高速往复摩擦磨损试验机针对材料表面及薄膜在不同载荷、不同频率、不同温度及不同气氛下高速往复运动形式的摩擦性能和耐磨强度进行定量评价；MS-T3000 摩擦磨损试验机对超滑材料（摩擦系数：0.001 量级以下）的摩擦学性能和耐磨强度进行评价；MFT-EC4000 电化学腐蚀摩擦磨损试验机主要针对腐蚀摩擦机理研究，从纳米、微观和宏观尺度上的多重测试，并且对表面处理材料、润滑材料及添加剂的选择进行定量评价。此外，还研制了 TCU-VS6000 高真空（超低温）沙尘摩擦磨损试验机、FCT-4000 超低温摩擦磨损试验机、SFT-4000 超高真空摩擦磨损试验机、MS-W6000 重载高温摩擦磨损试验机等。

（3）微动磨损与疲劳测试技术

微动的特点是由于外界的交变载荷在紧配合界面上导致微幅的相对运动。微动现象广泛存在于现代工业的各个领域，但不同部件由于相对运动模式不同，其微动损伤行为也表现出明显不同的形式。由于微幅相对运动难以精确控制，通常微动磨损与疲劳的研究局限于切向微动磨损和拉压微动疲劳。

西南交通大学朱旻昊等人在微动运行模式的研究上取得了突破，先后实现了径向微动

磨损和切向与径向耦合的复合微动磨损、扭动和转动微动磨损、扭转复合微动磨损，与光学显微观察系统结合可进行透明材料的微动磨损界面的实时原位观察^[69]，与振动和噪声检测技术结合可进行微动磨损接触界面摩擦振动噪声的监控^[70]。在微动疲劳试验手段方面，实现了扭转复合微动疲劳和弯曲微动疲劳的研究，针对高速列车轮轴的复杂微动疲劳损伤研制了轮轴旋转弯曲微动疲劳比例试验台，研究揭示了轮轴微动疲劳失效机理^[71]。

（二）工业摩擦学

1. 制造领域摩擦学

制造过程伴随着大量的机械运动和材料形变，也带来了大量的摩擦学问题。制造技术向“精密、高效、智能、复合、绿色”等方向快速发展，与之相关的摩擦学基础理论和应用技术也取得了重要进展^[72]。

（1）新型加工制造冷却润滑方案

在现代制造业中，材料冷热加工工艺向更高速度、更高效率和更高精度等方向不断发展，超高速切削的速度已超过 1500m/min，超精切削的厚度小于可见光波长，复合塑性成形工艺将数道工序同步执行。一方面传统润滑剂的性能不能满足使用要求，另一方面很多有机化合物润滑剂还会对环境造成污染。面向材料加工工艺的新型绿色高效润滑方法和润滑材料获得了快速发展。

第一，机械加工刀具表面处理技术。为实现刀具的延寿和高可靠性、高效率加工，一般通过表面涂层、表面改性或表面织构化技术对刀具表面进行处理。

针对刀具涂层的研究主要集中于涂层材料、镀膜工艺和涂层结构设计。刀具涂层不仅要具备优良的摩擦学性能，还必须与刀具基体材料的弹性模量、热膨胀系数和化学性能匹配，并适应刀具运行工况。根据刀具涂层的性质可分为两类：一类是以增强耐磨性为主的硬质涂层，如 TiC、TiN 以及 Al₂O₃ 等硬涂层；另一类是以减轻摩擦为主的“软质”涂层，如 MoS₂、WS₂、TaS₂、MoS₂/Mo、MoS₂/Ti 以及 WS₂/W 等自润滑涂层。相关研究主要集中于涂层结构的多层化、梯度化和纳米化设计，研究发现通过添加适当的黏结底层可增加涂层与基体的结合强度，通过不同调质波长的多层涂层可提高涂层硬度和韧性，通过不同成分过渡和梯度设计可获得承载能力、耐磨性、自润滑性和热稳定性俱佳的复合功能涂层^[73]。

表面织构的摩擦学应用是近年的一个研究热点，通过在刀具表面设计和加工特定的微结构图案，可改善刀具的摩擦状态，提高其导热、排屑性能。相关研究主要集中于刀具表面织构类型、分布和密度对刀具切削性能的影响，表面织构与传统润滑剂的协同复合效应等。

第二，准干式切削技术。准干式切削是在保持切削工作最佳状态的同时，使切削液的用量最少，主要包括雾化润滑切削技术和微量润滑切削技术。

雾化冷却润滑技术采用雾滴汽化方法对切削区进行冷却润滑。雾化的切削液滴快速渗透到加工面上，液滴吸收切削区的摩擦热并挥发脱水，而润滑剂的有效成分则滞留在工作区并持续地发挥润滑作用，从而提高工件表面质量和切削效率。

微量润滑是将压缩空气与少量润滑液混合汽化后喷射到加工区实现有效润滑的技术。微量润滑技术切削加工过程中,在刀具与切屑的接触界面会形成防护性气膜,并避免了传统浇注式润滑对刀刃的淬火脆化效应,可明显延长刀具寿命。在微量润滑磨削加工中,高速喷射的雾化润滑剂可突破砂轮回转表面的气障层保证接触点的可靠润滑,并可减少流体动压效应对磨削精度的影响。

当前的研究主要集中于微量润滑切削的润滑机理,微量润滑下摩擦热、摩擦力的变化,润滑剂施加方式,微量润滑对工件表面完整性的影响等基础科学问题^[74]。

第三,水蒸气冷却润滑技术。水蒸气冷却润滑技术已成为难切削材料加工过程的重要润滑方法。机械加工过程中冷却润滑剂必须进入刀-屑接触区才能发挥作用,在加工难切削材料时,切削力大、切削温度高、刀-屑间毛细管尺寸小、存在时间短。相比于乳化液的水包油结构,黏性阻力小的气态水分子更容易扩散进入刀-屑间的微间隙中并快速形成吸附润滑膜,从而减小切削变形和切削力。水蒸气快速挥发时还可吸收带走大量摩擦热,降低切削温度。此外,水蒸气无任何污染、不用回收。

第四,新型环保切削液。随着环境污染问题日益严重,“绿色制造”受到了全球重视。低能耗、低成本、低公害的水基切削液及其添加剂获得了快速发展,占据了约80%的市场份额。水基切削液可分为可溶油(乳化型切削液)、半合成液(微乳型切削液)及全合成液三类。其中可溶性乳化切削液的润滑性、冷却性较好,腐蚀性小,成本较低,但其属于亚稳体系,寿命较短、维护困难,常用于粗、中精度加工;合成液的冷却性、防腐性和维护性好,但润滑性、润湿性差,一般用于对冷却要求较高的粗磨或半精磨加工。微乳化液兼有乳化液和合成液两者的优点,使用寿命约为乳化液的5倍,应用最为广泛^[75]。

(2) 超精表面制造技术

超精表面制造是微纳制造领域的重要研究方向^[76]。在硬盘盘片-磁头、超大规模集成电路、光学器件等制造过程中,常常要求器件具备原子级的光滑表面。超光滑表面加工作为超精表面制造的一个重要组成部分,正日益受到人们的重视。超光滑表面加工大多通过CMP实现。在CMP工艺中,主要研究热点包括抛光液中的活性成分、纳米颗粒和被加工表面在纳米间隙下的相互作用、抛光液流场及压力分布、表面化学反应与机械去除的协同作用机理等^[77]。

国外研究表明,通过非磁性磨料在新型复合磁性流体的浮力作用下对旋转的工件表面进行抛光可以获得亚纳米级光滑表面,抛光过程中磨削力可以被精确控制。国内有研究者采用浴法抛光技术和纳米柔性刷抛光技术对石英和金属Cu进行抛光,都成功获得了纳米级的超光滑表面。清华大学路新春等研制的超低压化学机械抛光系统成功实现了Cu和阻挡层材料(Ta/TaN, Ru和Co)的高效、均匀抛光,研制的工业应用装备主要技术指标已达国际先进水平。

(3) 3D打印再制造成形的摩擦学应用

3D打印再制造的技术途径为:通过3D体视扫描技术获取再制造毛坯的轮廓参数,并

通过专门的软件与零件原始设计尺寸参数进行比对反求，得到再制造毛坯缺损区域的形状尺寸信息，通过 3D 打印技术逐层堆积恢复零件形状和尺寸精度实现再制造。特别是以材料去除为主要损伤形式的装备摩擦学零件，3D 打印再制造技术可实现再制造毛坯表层三维体积损伤的高效率、高可靠和高精度修复^[78]。

装甲兵工程学院、西北工业大学、哈尔滨工业大学等单位以及相关企业都大力开展了关键零部件和高附加值工业装备的 3D 打印研究与应用。针对汽车、冶金、工程机械等领域大量装备磨损和疲劳失效问题，装甲兵工程学院朱胜等与相关企业联合开展 3D 打印再制造技术攻关，攻克了汽车发动机 5C 件（连杆、曲轴、凸轮轴、缸体、缸盖）、冶金生产线大型轧辊和转子、混凝土泵车油缸活塞杆、挖掘机臂架等装备关键零部件摩擦磨损的高质量、高效率修复难题。

（4）材料表面摩擦状态监测智能涂层技术

摩擦运转零件服役过程中，表层材料的工作状态难于掌控。传统的材料级（标准试样）的磨损试验和接触疲劳试验多以振动、摩擦系数、温度等因素的异常变化作为评估材料摩擦磨损状态的特征量，当选定的判定因素超过了预设的门槛值，视为材料发生了失效，然后对失效部位进行微观分析，通过经验或经典理论反向推断失效机理，完成“事后判断”。这种“事后判断”方法不能显示材料失效演变过程，也不能掌握材料临界失效状态以便进行失效预警^[79]。

近年来，装甲兵工程学院、河北工业大学等单位尝试利用材料压电效应，在零件表面制备既具有耐磨损、抗疲劳性能，又具有压电传感性能的复合涂层。通过研究压电传感层的输出信号与摩擦副接触状态、零件表面完整性的映射关系，力图实现对材料表面裂纹萌生、扩展和材料去除行为的动态捕捉。目前的研究主要集中于传感涂层磨损和疲劳失效机理、传感信号特征量和门槛值的选取、实际服役工况下传感信号的提取和传输等科学问题。

2. 陆地交通领域摩擦学

（1）汽车摩擦学

汽车涉及大量的摩擦学系统，如动力系统、运动系统、传动系统和制动系统等。

第一，汽车发动机摩擦学。发动机摩擦学设计：针对活塞环—缸套的工况特殊，摩擦润滑分析考虑弹性变形及温度场、润滑油中颗粒以及表面形貌等因素，指导了环宽及廓面形状设计、减少环数以及润滑油的系统最佳化设计。摩擦润滑分析和活塞系统动力学方程结合，并全面考虑力变形和热变形影响，实现对二阶运动准确描述^[80]，指导活塞裙部型线优化设计、涂层减摩和减振降噪。针对配气机构，在耐磨涂层、减小接触力设计，以及耦合润滑理论和动力学的高速凸轮机构设计等方面取得进展。针对表面织构的摩擦学设计，在表面形貌功能特性和结构特性，及其在混合润滑和边界润滑下的效应方面取得明显进展。开发和借助仿真工具从摩擦学的系统依赖性、时变性和多学科耦合角度，对发动机摩擦学系统性能进行评估和优化。

发动机摩擦学新材料、新工艺研究：开发出高硅过共晶铝合金的缸体/缸筒材料、轻量化基材以及高性能减摩自润滑材料，显著减少摩擦损失。采用物理、化学或物理化学等新型表面处理技术手段提升表面性能是近年来的主要特征，包括复合镀膜、超音速火焰喷涂、气相沉积、类金刚石涂层等。

发动机摩擦学测试技术研究：开发活塞组-缸套摩擦力无线遥测系统，在倒拖及点火工况下可实现活塞组-缸套摩擦力的测量^[81]。在发动机台架试验中，采用在线铁谱技术建立多元分析指标的磨粒图像描述体系用以分析发动机磨损情况。

第二，汽车制动摩擦学。多重混杂增强纤维研究：开展了多重混杂纤维增强汽车制动摩擦材料的研究，用剑麻纤维、芳纶纤维、玻璃纤维、各种陶瓷纤维和矿物纤维等替代钢纤维。

高性能黏结剂体系研究：利用金属粉末或金属硫化物在高温下具有的特殊性能，减少树脂在摩擦材料中的使用比例，弥补树脂及橡胶在高温下的不足。

轻量化无污染研究：开展较低密度刹车片材料的研究，获得了重量轻、体积小、制动更安全新型陶瓷型刹车片。

第三，汽车轮胎/地面摩擦学。轮胎材料研究：进展主要体现在新材料研发与应用、轮胎结构设计优化和生产装备改进3个方面。如出现了一系列抗湿滑、降低滚动阻力和省油的改性丁苯橡胶（SBR）、顺丁橡胶（BR）和异戊橡胶（IR）、丁基橡胶（IIR）。

轮胎与路面匹配关系研究：基于分形理论建立了路面不平度的再现模型和橡胶粗糙路面接触面积改进模型。考虑路面形貌的三维表征和固体颗粒对轮胎的湿附着性能，建立了基于平均流量方程的轮胎-路面滑水模型，可用于分析轮胎湿附着性能^[82]。采用胎面单元侧向刚度能量法建立轮胎多边形磨损动力学模型，揭示了多边形磨损机理。

第四，汽车润滑系统摩擦学。活塞环-缸套的润滑理论计算模型：平均流量模型——三维粗糙表面参数由统计参数表达，引进压力和剪切流量因子，建立了平均 Reynolds 方程粗糙表面润滑分析。确定性模型——Hu-Zhu 模型可以精确求解混合润滑区域内每个点的膜厚和压力信息。

润滑膜的测量：电容法、荧光法、超声波法等技术实现了汽车典型润滑零部件间油膜厚度的测量，尤其是活塞环-缸套润滑副。

碳基固体膜润滑或固液复合膜润滑技术：类金刚石薄膜（diamond like carbon，简称 DLC）或类富勒烯碳薄膜比 CrN 涂层，大大降低了活塞环摩擦功耗、磨损率、噪声，改善密封性。DLC 薄膜与特定的润滑油脂和添加剂所形成的固液复合润滑可有效降低摩擦力。

表面织构技术对汽车活塞环-缸套润滑的改进：表面织构技术可以显著改善润滑与摩擦性能，已在机械端面密封和内燃机活塞环-缸套接触副中得到广泛应用，使摩擦系数降低 20% ~ 40%，油耗降低 4%。

第五，汽车传动系统摩擦学。变速箱系统：在螺旋锥齿轮润滑研究方面取得进展^[83]，使对重载滚-滑下齿轮摩擦润滑性能有了进一步的认识。开发了基于在线铁谱油液分析技

术的齿轮箱磨损状态在线监测技术、基于极坐标角-频分布和 BP 神经网络法的变速箱齿轮磨损状态监测方法，以及基于信息熵和灰色系统的故障诊断和磨损寿命预测方法等。

离合器摩擦学：在摩擦片摩擦性能的仿真分析方法、离合器以及摩擦片表面的摩擦学设计、摩擦片材料的制备与性能研究以及摩擦片摩擦性能的实验研究方面取得进展。

（2）铁路摩擦学

铁路摩擦学研究近年来在我国发展迅速，主要针对轮轨系统、弓网系统、制动系统和紧配合连接的关键摩擦学问题进行研究，而且主要针对高速铁路。

第一，轮轨摩擦学。高速列车轮轨接触行为研究：考虑轮轨高速惯性、高频弹性振动、接触振动、轮轨接触几何表面形貌和材料应变率效应等，建立了高速轮轨瞬态滚动接触力学模型。考虑轮对柔性弯曲和轮轨接触模型，建立了车辆/轨道刚柔耦合动力学模型，为高速轮轨磨耗和噪声机理研究提供了研究手段。

高速列车轮轨黏着行为研究：基于部分膜弹流理论、平均流量模型以及微观固体接触模型，建立了高速轮轨黏着三维计算模型，并得到了试验验证。利用大型轮轨模拟试验机系统，获得了存在水或油污染时，考虑列车速度、轮轨表面粗糙度以及轴重等参数的轮轨黏着特性曲线，从而优化了轮轨增黏措施^[84]。

高速列车轮轨磨耗和疲劳损伤研究：跟踪测试，掌握了我国高速车轮磨耗的特征和演变规律，及其对车内噪声的影响，发现了高速车轮高阶多边形磨耗现象。考虑车辆悬挂参数特性、线路随机谱激励、轮对踏面磨耗规律，提出了高速列车轮对踏面设计新方法（简称“磨耗量预置法”或“均良设计法”）。掌握了我国高铁钢轨波磨的特征和演变规律，揭示了其形成机理。基于疲劳和断裂力学理论，建立了考虑磨损作用下的钢轨疲劳寿命和剩余寿命预测模型。建立了我国不同运输条件下的钢轨分级使用制度，已成为铁路行业标准。

轮轨摩擦噪声研究：建立了满足 500 km/h 速度等级的高速列车车内外声源识别系统，测试掌握了我国高速列车的噪声源和频谱特征，发现我国高速列车车外噪声主要来自轮轨噪声。建立了高速车轮-轨道耦合振动-声辐射计算模型，为噪声控制提供了理论依据。

第二，弓网摩擦学。动态电弧的观察与表征：揭示粗糙峰摩擦接触的随机性决定了电接触的随机性，由此导致电弧产生的随机性。对于动态平衡的载流摩擦系统，宏观上电弧具有平衡性和统计性。研究表明随着电流和滑动速度增大，燃弧率和电弧能量增大，即电弧危害增大。

弓网材料磨损机理研究：载流摩擦中材料的损伤包括机械磨损、腐蚀磨损和电弧侵蚀，具有耦合作用特征。发现温度是影响滑板材料磨损的主要因素。高速下，电流产生的电阻热和电弧热以及摩擦热使得摩擦副的表面温度显著升高，最终导致弓网材料，特别是滑板材料的异常磨耗^[85]。

第三，高速制动摩擦材料。材料设计研究：突破了原有列车制动摩擦材料以铁为基体的惯例，采用低熔点、导热优异的铜基体，降低摩擦表面温度，提升材料承载能力；克服铁铜有限固溶特性，大大提高了铜基体的强度和耐磨性。开发了多尺度新型摩擦组元体

系,开发了针对不同苛刻工况的系列高非金属组元含量的新型粉末冶金摩擦材料,并解决了材料复合技术难题。

摩擦磨损机理研究:揭示了制动盘和闸片的摩擦振动/噪声和摩擦副材料过度磨损等问题。

高速制动试验技术:构建了国际上最先进的500km/h以上高速列车基础制动试验台,集成了网络化数据采集、无线测试、高温应变测试、振动与噪声测试、红外热成像测试等技术,能满足国内高速制动材料研发需要。

第四,轮轴、电机轴和紧固螺栓微动摩擦学。弯曲微动疲劳机理:针对高速列车轮轴和电机轴等关键部件,揭示了弯曲微动疲劳寿命与微动区域的关系;表明微动斑损伤机制主要为磨粒、氧化和疲劳磨损;发现裂纹萌生于次表层,并有3个阶段扩展特征。发现了两种弯曲微动疲劳裂纹的两种萌生机制(孪晶机制和位错胞变形成核机制)^[86]。

旋转弯曲微动疲劳机理:发展了一套有效的轮轴和电机轴失效分析方法。研制了新型旋转弯曲微动疲劳试验系统,发现疲劳寿命随运行速度的增加而降低,并有一个寿命凹区。发现旋转弯曲微动疲劳寿命与载荷的对数关系不再遵循传统的Basquin关系;其断口呈多源性、台阶状特征。

螺栓松动机理及防护技术:试验证实了螺栓松动和断裂是微动失效的结果。揭示了螺栓连接的应力分布特征和松动过程的3个阶段特征;发现其损伤是集磨粒磨损、疲劳磨损、黏着磨损和氧化磨损4种机制于一身的复杂过程;提出了基于微动磨损理论的螺栓松动预防措施。

3. 航空航天领域摩擦学

第一,固体润滑剂。目前应用于航空航天领域的润滑与耐磨薄膜主要有 MS_2 和软金属润滑薄膜。通过对它们的多层化处理以及不同元素和化合物的掺杂/复合技术,人们设计和制备了适应于不同环境的长寿命固体润滑薄膜,如WC/DLC/ WS_2 自适应薄膜、超晶格结构 MoS_2/WS_2 薄膜、非晶纳米晶超硬高韧一体化结构薄膜^[87]。通过向 WS_2 薄膜中引入异质元素C或N,制备出了具有较高硬度的 WS_2-C 和 WS_2-N 复合薄膜;通过向 WS_2 薄膜添加金属Ti,有效地诱导薄膜结构致密化与非晶化,使 WS_2 基复合薄膜呈现出更好的摩擦学性能。采用离子镀技术等新技术制备了纳米多层软金属薄膜和电接触软金属固体润滑薄膜等,并对薄膜的空间环境效应和摩擦磨损机理开展了系统的研究工作。

碳基薄膜能有效地改善零部件的耐磨性、耐腐蚀性,并可降低摩擦、磨损,提高综合机械性能,在齿轮、汽车及铁道机车车辆、航空航天等领域具有广泛的应用前景,但是其存在着环境敏感性及其使用温度的局限性等问题。为了解决这些问题,人们利用纳米多层梯度复合技术和纳米晶/非晶多元复合技术相继开发了Ti/TiC/DLC/n-(Ti-DLC)多层复合薄膜、多层化TiC/a-C纳米复合薄膜和金属掺杂纳米复合碳膜(Me-DLC)等强韧化碳基复合润滑薄膜^[88]。采用等离子气相沉积技术和磁控溅射等复合技术在薄膜的结构与性能方面也获得了突破,制备出了超低摩擦和超弹性类富勒烯结构和自组装双纳米结构碳基

薄膜。

第二，润滑涂层。在航空航天高技术领域需求的牵引下，固体润滑和耐磨涂层得到了长足发展，也取得了显著成果^[89]。利用黏结固体润滑涂层技术成功解决了火箭分离机构的防冷焊润滑问题，发展了空间润滑与防冷焊涂层；通过合理选择溶剂与树脂体系与填充组分的优化配比，突破了固体润滑剂装罐技术，发展了新型高承载长寿命耐腐蚀固体润滑涂层；通过黏接剂改性、润滑剂选择与复配、增强相优化，解决了涂层在煤油长期浸泡环境中的溶胀和脱落问题，发展了耐航空煤油高强度长寿命固体润滑涂层；采用热喷涂技术，通过组成设计和结构优化，解决了航空发动机涡轮外环、涡轮盘、封严跑道等部件的高温润滑耐磨问题，发展了 NiCrAlY 基、NiMoAl 基高温及宽温域自润滑耐磨涂层；采用热喷涂技术，有效防止零部件因磨损导致的使用寿命降低和构件失效，发展了 WC+Co、WC+NiCr、Al₂O₃+TiO₂、CoCrW 等系列发动机用耐磨涂层。

第三，聚合物复合材料。应用于航空航天领域的聚合物复合材料主要包括聚酰亚胺自润滑复合材料、聚四氟乙烯自润滑复合材料和聚氨酯水润滑轴承等。①聚酰亚胺自润滑复合材料又分为热固性、热塑性聚酰亚胺。国外已经发展了涵盖 280 ~ 450℃ 使用温度范围的系列化的四代聚酰亚胺树脂基复合材料，第一、二代已广泛应用，第三代已通过考核验证，第四代有机无机杂化聚酰亚胺树脂的研究也初步形成牌号，玻璃化转变温度高达 489℃，可在 425℃ 以上长期使用，可在 815℃ 下短期使用。中国科学院化学所的 KH400 系列的热固性聚酰亚胺的自润滑复合材料耐温等级可高达到 400℃ 甚至更高；中国科学院兰州化学物理研究所将基于热固性聚酰亚胺的自润滑复合材料应用于发动机耐高温组合式蓄能密封圈中，实现了长期 300℃ 下良好的气密封效果^[90]；热塑性聚酰亚胺的耐温等级相对较低，国产的 YS20 玻璃化转变温度只有约 260℃，无法满足长期 280℃ 的使用要求。②聚四氟乙烯自润滑复合材料已经大量应用到发动机重要转动机构、关节轴承、挡圈、密封垫片等多处密封部位。③聚氨酯水润滑轴承具有工作寿命长、低摩擦系数、易更换等优点，已经得到了广泛应用。目前人们正开展改善聚氨酯复合材料性能的研究工作。通过物理和化学相结合的方法协同改善聚氨酯复合材料的机械性能和摩擦学性能；采用紫外光辐射交联、环氧交联等方法以提高聚氨酯材料的热稳定性等。

第四，自润滑多层复合材料。目前，国内急需的该领域产品根据使用需求主要分为三种：低速重载自润滑衬垫、高速轻载自润滑衬垫和耐高温自润滑衬垫。①低速重载自润滑衬垫材料：目前有 2 ~ 3 种国产重载低速自润滑衬垫，其动承载能力、静极限载荷以及耐磨寿命均已达到美标 81820 要求。其中，某种衬垫的动承载能力已经达到 400 MPa，为美标要求的 1.5 倍；少量国产低速重载自润滑衬垫初步应用于新型飞机。②高速轻载自润滑衬垫材料：中科院兰州化学物理研究所已经研发出三种运动速度达到 4 ~ 9m/min、耐磨寿命达到 500 ~ 600h、满足美标 81819 要求的高速轻载自润滑衬垫，其中两种已经通过了轴承通用评估考核，即将进入地面试验阶段。③耐高温自润滑衬垫材料：已经研制出一种动承载能力达到 186 ~ 250MPa、使用温度最高达到 240℃ 的耐高温自润滑衬垫，并成

功应用于国产发动机^[91]。

第五，空间液体润滑剂。目前，空间液体润滑剂主要包括含氟氯苯基硅油及其润滑脂、聚烯烃取代环戊烷及其润滑脂、硅碳氢润滑油和新型低挥发高性能空间用润滑添加剂。由于硅油具有良好的低温性能和优异的低挥发性能，但其润滑性能较差，采用三氟丙基及氯苯基两种组分同时引入了氟、氯等元素，能够很好地解决硅油的润滑性能差的问题；碳氢润滑油具有优异的润滑性能，与添加剂的相容性也非常优异，其缺点是黏温特性较差，与硅油结合可以其同时具有良好黏温性能与优异润滑性能；聚烯烃取代环戊烷及其润滑脂既具有聚 α 烯烃（PAO）良好的润滑性能、优良的低温性能和良好的抗氧化性能，又具有多烷基化环戊烷（MACs）良好的真空挥发性能；离子液体具有优异的润滑性能，且具有极高的热稳定性和蒸发损失，已成为新型低挥发高性能空间用润滑添加剂。

第六，空间活动部件摩擦学应用。空间活动部件一般由活动件、轴系和静止件组成，活动件借助轴系围绕静止件发生转动或摆动等运动，轴系主要采用齿轮、谐波齿轮、丝杠、带传动、联轴器、弹性枢轴、轴承等零组件实现力（力矩）和运动的传输。其中轴承在活动部件中应用最为广泛，润滑形式包括固体润滑、油润滑、脂润滑等多种形式，涉及的空间摩擦学问题异常复杂。因此，空间活动部件摩擦学应用主要体现在空间精密轴系长寿命润滑技术、长寿命润滑工艺技术、关键材料应用技术和润滑寿命试验及评估技术等技术应用。

4. 能源领域摩擦学

中国已成为世界上第一位的能源生产国和消费国。为了确保我国经济的可持续发展以及解决日益凸显的环境问题，能源资源的充分利用以及能源结构的优化调整迫在眉睫。能源生产的高效化、智能化，对该领域机械装备的设计、运行等方面提出了高要求和新要求。如其他机械设备一样，能源领域机械装备在运行过程中不可避免地涉及摩擦、磨损、润滑等摩擦学问题，摩擦学知识和新技术的应用对于能源装备的正常高效运行至关重要。鉴于我国正处于能源生产由落后向先进快速转变的关键过程中，能源领域摩擦学的研究与应用对我国的能源产业至关重要，国内相关研究单位也开展了卓有成效的研究工作。

煤炭的生产过程主要包括开采、运输和后加工三个过程。煤炭开采设备中涉及的主要磨损部件为截割煤部件（截齿）、安装部件（滚筒）；采煤机传动部件；采煤机运动支撑部件（滑靴和行走轮等）。中国矿业大学刘洪涛、张德坤等对截齿、滑靴、行走轮等的失效形式和耐磨材料进行了研究，采用等离子熔覆技术、激光熔覆技术、耐磨焊条堆焊等在滑靴表面熔覆外加耐磨材料提高其抗磨性；或用渗碳技术来强化基体表面，近期还出现了对滑靴和行走轮材料进行深冷处理以降低其残余奥氏体含量的研究，取得了一定效果^[92, 93]。在煤炭运输方面，研究人员通过新材料的应用、表面改性等技术手段研究解决了刮板输送机中部槽的耐磨性差的难题；对于摩擦式提升机垂直交叉接触钢丝绳的微动疲劳行为，通过有限元法分析了直拉钢丝绳的应力、变形分布，定性分析了矿山腐蚀环境下微动损伤和疲劳参数对钢丝微动运行区域与疲劳断裂机理的影响；探讨了带磨损缺口钢

丝疲劳寿命与钢丝微动磨损深度之间的关联关系，及无损伤钢丝微动接触面的裂纹萌生特性；并且开展了高性能的摩擦式提升机衬垫材料的产品研发、摩擦学性能研究和力学性能研究，以及钢丝绳与衬垫之间的交互作用机理，提升速度对衬垫摩擦性能的影响，摩擦衬垫动态热物性能及其对瞬态温度场的影响、衬垫滑动热-应力耦合行为的研究等，并有针对性地开发了摩擦衬垫摩擦系数测试实验机。在煤炭加工和煤化工方面，主要开展了加工过程中所使用的配件耐磨设计等研究工作，如破碎机齿板的材料开发，磨煤机衬板、磨辊及磨盘衬瓦的失效分析及修复，煤化工锁斗阀、耐磨阀门的设计，油煤浆输送管路弯管部位液固两相流流场的数值模拟与磨损预测，选煤厂耐磨管道修复，新型防磨省煤器输灰管弯头设计与试验研究，以及喂煤转子秤部件的耐磨改进等。

在石油领域，我国的石油勘探开发向深海、深部、沙漠、高寒及海外发展，对石油天然气装备技术性能提出更高要求，尤其是钻探、开采、输送等复杂苛刻过程中，急需与环境条件相适应的应用摩擦学新理论与新技术支撑。在石油钻采关键装备方面，钻头、套管、钻井绞车刹车、螺杆泵、油管等关键设备的寿命和可靠性都与其表界面的摩擦学行为和磨损情况紧密相关，国内研究人员在近 5 年加强了石油钻采装备摩擦学行为基础研究，通过建立新的失效机理和模型、发展新材料、新工艺，获得了一系列提高石油钻采设备运行寿命与可靠性的摩擦学新成果、新技术^[94-96]。在石油天然气输送方面，涉及的主要摩擦学和表界面问题为管壁蜡沉积物去除及其防蜡防污涂层；智能清管器运动支撑部件橡胶皮碗和耐磨探头；输送管网减阻防腐涂层和耐蚀抗磨部件等。通过对机械清管器驱动系统的橡胶构件进行可视化摩擦学测试，实现蜡沉积物机械剥离过程的跨尺度工况定量描述；通过研究不同输送参数下原油/水/天然气等多相体系流变力学行为，构建输油管道聚合物减阻、节能降耗作用解析模型，形成天然气管道减阻防腐涂层创新设计新方法等。在海洋石油装备方面，开展了海洋平台在海洋环境中的风载、浪载等多重载荷作用下的力学性能、平台桩腿连接部位的微动磨损、极区海冰与平台结构物的摩擦磨损、自升式平台的齿轮齿条磨损等问题的研究工作，开展了海底管线铺设过程、海洋油气定位设备、水下油气生产系统等摩擦学问题的研究工作。

在核电领域，西安交通大学的张国渊、袁小阳等研究了核主泵轴承多流态液固热强耦合条件下界面构型和润滑模型^[97, 98]，核主泵轴承部件的润滑膜形成机理和轴承失效机理，对于屏蔽泵大负荷水润滑轴承性能预报方法、寿命预估方法进行了一定的探索。西南交通大学的朱旻昊、蔡振兵针对传热管（690 管）与抗振条在径向\复合、切向、冲击微动等模式下的微动磨损问题开展了系列研究。针对燃料棒组件磨损问题，中国原子能科学研究院陈彭在汲取国内外近年研究经验的基础上，在国内首次研制出核电站燃料棒破损在线探测系统 FDDS。复旦大学与上海核工程研究设计院建立了微动疲劳试验平台，该试验台可附加在 MTS 疲劳试验机上进行燃料棒包壳管常温及高温条件下的微动磨损及疲劳试验。中国广核集团苏州热工研究院的薛飞等研究了核电站蒸汽轮机磨损问题，认为叶片与轮盘之间的相对滑动是导致其在服役过程中发生微动磨损的主要原因。

在风电领域，风力发电装置的关键摩擦部件包括齿轮箱、发电机轴承、偏航系统轴承与齿轮、液压刹车系统和主轴承。风电齿轮箱运转是一种在无规律变向载荷和瞬间强冲击载荷作用下工作的重载齿轮传动装置，当前国内风电齿轮箱中的齿轮故障率在各部件故障中所占的比例达到 60%，并且是维修更换费用最昂贵的部件之一。为解决齿轮箱故障的难题，国内针对其摩擦、应力接触和微点蚀方面开展了大量的研究工作。例如，针对兆瓦级风力发电增速齿轮箱齿轮传动系统运用非线性有限元法对齿间润滑摩擦力的产生及分布规律进行研究^[99]，应用于风电机组的铜基摩擦材料制备与性能研究，风电齿轮齿面微点蚀产生机理、影响因素及其控制方法的研究，基于 FZG 齿轮试验机、MPR 试验机的风电润滑油抗点蚀性能评价方法的研究，风电齿轮箱润滑油静态油量与动态油位变化幅度及油位回升时间与风场风速之间的关系研究。轴承是风力发电机的又一核心部件，目前主流的双馈式发电机用轴承主要包括：偏航轴承、变桨轴承、主轴轴承、发电机轴承等，而直驱式风力发电机由于简化掉齿轮箱，其轴承部分主要有偏航轴承、变桨轴承和主轴轴承组成。其中大型偏航轴承和主轴轴承技术难度较大，现在基本依靠进口，是风机国产化的难点之一。近年来，中国科学院兰州化学物理研究所、中国石化润滑油公司、中国石油润滑油研发中心等开展了系统的研究工作，开发了系列化的风电设备专用润滑油脂产品及其评价应用技术。

5. 海洋装备领域摩擦学

海洋摩擦学是为应对海洋资源开发以及海上运输、军事活动等的需要而发展起来的一个新兴的研究领域，是建立在海洋环境及其介质特性基础上的摩擦学研究，主要研究对象是各种海洋开发和营运于海洋环境的装备，具体可归结为船舰、海洋结构物、水下航行器/水下空间站中的摩擦学问题。

船舰所涉及的摩擦可以分为内摩擦和外摩擦两部分，内摩擦主要体现在船舰动力机械的关键摩擦副上；外摩擦主要研究对象是船舰与空气和水接触的界面部分，实现船（舰）体表面的防污减阻是核心任务。船舰在水中航行时，船舰与水质之间不可能避免的产生交互作用，船舰在航行时必须获得动力以克服水对船舶的阻力而前进，从而共同构成集内摩擦和外摩擦于一体的摩擦学体系。

针对目前应用仍最为广泛的柴油机动力系统，清华大学、武汉理工大学、中国科学院兰州化学物理研究所、合肥工业大学、江苏大学、南京航空航天大学、华南理工大学、中北大学、装甲兵工程学院、大连海事大学等单位一直致力于不同表面纹理微结构的摩擦磨损改性机制的探索以及相关润滑改进措施的研究，在此方面取得了一些重要进展，并已部分开始进入应用阶段，提升了船舶柴油机缸套-活塞环等关键摩擦副的摩擦学性能^[100]。在高流速的海水中，螺旋桨和舵易发生冲刷腐蚀磨损和空泡腐蚀磨损，近年来复合材料螺旋桨获得重要突破，复合材料螺旋桨不仅可以减轻重量，而且可自动调节桨叶变形以达到改善其水动力性能。船舰动力机械装置中的摩擦学问题还包括联轴器、齿轮箱、推力轴承、中间轴承、艉轴承的润滑和密封。目前水润滑艉轴承的应用受到极大关注，对水润滑

轴承的研究在水润滑轴承理论（如流体模拟计算、结构设计、台架试验检测性能等）、新型水润滑轴承材料（如陶瓷材料、以橡胶为基体的高分子材料、超高分子量聚乙烯等）以及水润滑轴承寿命评估等方面均取得重要进展^[101, 102]。由于振动和摩擦造成的船舰推进系统的异响也是一个重要的研究范畴，在船舰推进异响的产生机理和解决措施方面多家单位开展了重点研究，获得了一些有意义的进展。

舰船外表面防污方面，表面结构仿生配合化学表面改性提供了制备具有防污性能表面的可能性。例如，在氟碳树脂/水性聚氨酯等成膜材料中添加电气石/PTFE/TiO₂等纳米粉体进行改性、优化掺入工艺并研究防污机理。再者，通过分析生物肽改性金属材料的研究现状，研究生物肽对不锈钢进行改性，及改性对其电子逸出功、硬度、表面能等的影响。为利用改性金属材料低表面能的特性实现防生物污损的研究提供参考。减阻方面，沟槽减阻、仿生非光滑减阻、高分子聚合物减阻、柔性壁减阻、微结构减阻、微气泡减阻和微喷流减阻等得到了重点关注。清华大学汪家道等人探索了液滴下截留气体存在的必须满足条件，以此理论为基础，实现横向沟槽结构的优化设计。江雷院士等指出金属基超疏水表面最有可能应用于舰船表面的防污减阻领域。美国 Chang-Hwan Choi 等对位于具有高雷诺数的水/空气边界层区域（平板绝大部分浸入水中）、平面铝板超疏水表面的减阻性能进行实验研究，其结论可用于指导舰船表面防污减阻超疏水表面设计和工程应用，意义重大。大连海事大学张会臣和傅迎庆等使用激光加工/溶液刻蚀/热喷涂等方法在镁合金/钛合金/船用钢板等金属基底或硅基底表面构建微结构，再利用低表面能物质来修饰这些微结构表面，获得具有超疏水表面的膜结构，并研究了其表面性能和减阻机理。武汉理工大学白秀琴等通过对不同类型贝壳表面微观结构的研究，提出了基于贝壳表面微结构的船舶绿色防污的概念，通过对典型贝壳的沟槽纹理表面的流场进行仿真分析来获取最佳减阻效果的表面微结构^[103]。

海洋结构物在海洋环境下的摩擦磨损问题主要包括海洋交变载荷、海水腐蚀等作用下的平台结构及设备疲劳损伤、海洋钻采设备的腐蚀冲蚀磨损、锚泊和动力定位系统的摩擦问题和海冰对海洋结构物的摩擦问题。国内针对海洋交变载荷、海水腐蚀等作用下的平台结构及设备疲劳损伤研究较多，最为突出的摩擦学问题是钻井套管、作业泵、管件的腐蚀磨损，相关研究主要集中于深井、超深井及大位移井套管磨损机理及预测技术，中国石油大学（北京）樊建春等研制了全尺寸动载套管磨损试验机，实现了对套管与钻杆接头之间多种磨损工况的模拟，根据固体颗粒对基体材料切削或微切削的作用以及固体颗粒对材料冲击的情况，提出了固体颗粒形状、含量、冲击速度、冲击角对腐蚀磨损影响的复合模型等。硬质涂覆涂层可用于抵抗冲蚀磨损，如超音速等离子喷涂和火焰喷涂，高速电弧喷涂 WC-CoCr 涂层，Al 基、Fe 基和 Ni 基非晶涂层，激光熔覆和等离子熔覆高熵合金涂层等。金属表面纳米化和等离子渗氮、阳极氧化、微弧氧化、激光表面织构、化学气相沉积等复合工艺可用于大长径比、小孔和复杂外表面的钻杆（钢质、铝合金、钛合金）、油管、螺纹接头和井下导向机构的表面强化处理。金属表面纳米化处理可有效改善异质焊缝的组织

结构和力学性能,提高焊缝的耐腐蚀和耐冲蚀性能。另外,新型超硬金刚石材料和硬质合金复合材料的应用可大幅提高聚晶金刚石复合片钻头、扶正器、井下动力机构、推力轴承和压裂钻具等的抗磨粒磨损性能和使用寿命。

随着深海石油的开采,浮式平台结构得到广泛应用,传统的锚泊定位和动力定位系统的摩擦问题也较为突出。国内对锚泊定位系统摩擦学研究主要集中在锚链及其所使用的系泊链钢材料的磨损及腐蚀问题。刘金沅研究了在海洋环境动力要素与平台运动联合作用下的锚链全域内各节点接触面及链环结构内部响应,建立长期动力响应的工程化数值模型。借助数值模拟的计算结果研究锚链节点接触表面的腐蚀和链环间摩擦作用之间的影响规律、耦合机理,建立锚链节点接触面累积腐蚀、磨损耦合损伤的工程化评价模型。

近年来,对特殊区域、特定环境下的摩擦磨损问题研究比较热门,例如海冰在风和海流的驱使下将产生运动,使得该区域的海洋结构物受到浮冰或大面积冰块的作用而产生相互摩擦作用,同时风和海流的作用使碎冰可能发生后爬现象而造成海洋结构的磨损。目前国内对海冰对海洋结构物的摩擦学问题主要是将摩擦力作为冰载荷的一种,并且均是从仿真的角度研究其对结构物的作用力,力求为海洋结构物的设计提供理论依据。不仅冰载荷影响海洋结构物,而且新建造的海洋结构物在下海后很快就会附着上大量的海洋污损生物,污损生物的附着、生长不仅增加了海洋结构物的体积和表面粗糙度,显著增大波浪所引起的动力载荷效应,而且由于改变了原有的界面状态,在风暴和风浪条件下,其界面的摩擦磨损行为也大大改变。针对这方面的问题,中国科学院兰州化学物理研究所、武汉理工大学、吉林大学、华南理工大学、中国海洋大学、中国科学院福建物质结构研究所二部、武汉材料保护研究所等单位在低表面能海洋防污涂料研究方面开展了重点工作^[104]。

水下航行器与水下空间站的发展在一定程度上体现了一个国家的综合技术力量和水平。对水下航行器与水下空间站关键部件在典型海洋环境下(高压、高盐分、低温和微生物附着等)的摩擦学问题进行分析研究十分必要。在深海探测与开发装备中,海水液压系统发挥着极为关键的作用。海水泵等液压元件关键摩擦部件在海水工作环境中的高损伤是制约海水液压系统可靠性、工作效率以及使用寿命提高的关键因素。华中科技大学、浙江大学、中国科学院兰州化学物理研究所等单位一直致力于海水液压元件关键摩擦副损伤机制的探索以及相关改进措施的研究,以高性能的工程塑料(比如聚甲醛、聚醚醚酮塑料等)部分替代金属部件,避免金属间的直接配副,可以在一定程度上缓解液压系统摩擦部件的损伤程度。

深海作业的水下航行器与水下空间站的耐压性、密封性和润滑性能等引起了越来越多摩擦学研究者的关注。西北工业大学、清华大学、北京航空航天大学、西安交通大学、中国石油大学、吉林大学等对沟槽面减阻进行了相应的研究。机械密封是有人/无人潜航器、潜艇、水下武器、油气钻采和输送机械等海洋装备的关键基础部件,其作用是避免高压海水进入耐压舱体,保障装备或者人员的安全性。然而我国在深海装备用机械密封领域开展的研究较少,尤其是在油气钻采设备和深潜器所用高变压力和恶劣工况的机械密封的研制

方面还处于初级阶段。在海洋环境中密封环配对副的摩擦磨损与润滑性能以及变压工况下密封环端面变形控制方面的研究不深入，失效原因与相应机理还不完全清楚。

6. 生物摩擦学与仿生摩擦学

生物摩擦学主要研究天然生物系统内部器官和外部表皮组织特有的生物摩擦学性能，研究人工组织器官或生物替代材料的摩擦磨损机理和失效机制。仿生摩擦学是运用仿生学原理，通过对生物系统的减摩、抗黏附、增摩、抗磨损及高效润滑机理的研究，模拟进而创新摩擦学技术系统或研制摩擦学新材料。生物摩擦学是以生物系统的摩擦问题为核心，面向生物体的生存、生理和生长相关的研究，如探寻人造器官置换、疾病成因、人造器官磨损、运动行为及结构特征等；而仿生摩擦学以仿生应用为前提，运用摩擦学的理论和方法分析生物运动过程的接触、摩擦、磨损和润滑等结构原理和材料特性，并将其基本理念转化为仿生结构或新材料的研究开发，侧重仿生结果，以期解决实际工程问题。

（1）硬体生物材料摩擦学的最新研究进展。

我国在人工关节的生物摩擦学的研究主要从两个途径开展，一是骨科医生对临床使用的关节进行分析，获得关节材料的磨损及生物相容性的数据，如浙江大学医学院附属第二医院、延安大学附属医院、中日友好医院等；二是科研单位对关节材料进行更为系统的理论研究，比较突出的单位有中国矿业大学、西安交通大学、西南交通大学、清华大学、上海交通大学、南京理工大学、北京科技大学等。

人工关节的研究主要集中在四个方面：①人工关节滑动界面摩擦、磨损和润滑特性的研究：滑动界面的材料、处理方式、粗糙度等参数均会影响其使用寿命，材料的耐蚀性也是影响其磨损总量的重要因素^[105]。②人工关节固定界面的生物摩擦特性研究：微动为固定界面生物摩擦特性的主要影响因素。微动会造成固定界面的不断松动，并可能最终引起人工关节的失效。固定界面的微动磨损研究发现，固定界面在微动作用下也会产生磨屑，造成固定界面的松动。③磨屑的生物反应和磨蚀的影响：人工关节在服役过程中的产物为磨屑和金属离子。目前研究发现，磨屑会引起生物细胞的反应，在一定尺寸范围内的磨屑是造成溶骨症的主要原因。金属离子的长期影响目前还没有定论，但是短期实验发现，其会引起严重的生物反应。④新型人工关节材料和表面处理方法的研究：提高人工关节材料的耐磨性和润滑性，减少有害的磨屑和其他产物的生成是发展安全、长寿命人工关节的根本。目前人工关节对设计寿命是 15 年，临床也出现过 30 年以上的寿命案例，而全球在致力于 50 年寿命的人工关节研究。

牙齿的生物摩擦学：牙齿适度磨损具有一定的临床意义，过度磨损则会诱发多种口腔疾病。西南交通大学周仲荣团队针对人体天然牙及牙科材料的摩擦学行为、机理及自修复等关键科学问题开展了系统的研究^[106]，发现人牙釉质的微摩擦磨损行为呈现各向异性，牙釉质里面微量的水分和有机物使其具有很好的自我保护机制。在纳米尺度下，牙釉质磨损以羟基磷灰石纳米纤维束的压溃变形和羟基磷灰石颗粒的去除为主，不呈现脆性破坏机制。无论是磨损形貌还是对水润滑的反应，牙釉质的往复滑动磨损行为更接近韧性的金属

材料黄铜。

酸性环境下牙齿的机械磨损与化学腐蚀存在竞争关系,随着法向载荷增大,酸蚀软化导致的黏着剥落减弱,牙齿磨损逐渐以载荷作用导致的脆性剥落为主。酸蚀引发釉柱快速溶解导致釉柱的支柱作用丧失,加剧牙齿的机械磨损,人牙釉质的酸蚀行为与酸蚀位置密切相关。通过再矿化作用,酸蚀牙釉质表面可以生成一层类牙齿无机相的矿物质,改善牙齿表面的耐磨性。牙齿表面的唾液吸附膜通过层层组装而成,初始吸附膜与牙釉质之间的结合强度远大于初始膜和外层膜之间的结合强度,因此,唾液吸附膜的润滑性能主要取决于初始膜。基于模拟口腔环境条件下若干种代表性牙齿修复材料及表面涂层的摩擦学性能研究结果,提出理想修复材料的抗磨性能与天然牙固有磨损量匹配一致为最佳的设计思路,指出固定界面由“紧配合”向松动发展是种植牙紧配合面在骨整合后随时间增加失败率增加的非生物医学原因。

(2) 软体生物材料摩擦学的最新研究进展。

天然软骨和仿生软骨材料的生物摩擦学:国内针对天然软骨和仿生软骨材料的生物摩擦学开展了大量研究工作。研究发现天然软骨表面轮廓具有几何不规则的特征,表面轮廓对变形和摩擦系数有着显著影响,在滑动摩擦过程中,接触面积影响软骨摩擦副的摩擦行为,与摩擦因数和波动位移呈负相关性,在动载荷下,软骨的摩擦系数有较大的降低。关节软骨在扭动摩擦处于部分滑移状态时,软骨表面损伤轻微,损伤机理为表面褶皱。处于滑移状态时,损伤机制为表面裂纹与剥落。

水凝胶仿生软骨是一种固-液两相的多孔材料,与天然软骨有类似的力学特性及渗透特性,广泛应用于关节软骨修复。影响水凝胶人工软骨摩擦磨损性能的因素较为复杂,与材料的应用环境、摩擦配副、润滑剂和自身性能等因素有关。纳米羟基磷灰石与聚乙烯醇原位合成后经过冷冻解冻和辐照交联相结合的方法制备的PVA/HA复合水凝胶仿生关节软骨材料具有良好的亲水性能和多孔结构,在其摩擦的起始阶段,两相润滑机制起主导作用,摩擦系数小,随着载荷作用时间的延长,摩擦系数逐渐增大并达到平衡,润滑机制转为边界润滑。利用化学接枝法实现了PVA水凝胶与超高分子量聚乙烯的软面-硬面结合,其生物摩擦学实验发现,PVA水凝胶摩擦系数与液相承载成反比例关系,摩擦系数随法向载荷的增加而增大。水凝胶表面液体的挤出、渗入流动起到承载润滑的作用,并且能够不断溶胀使其具有力学性能恢复及自润滑的功能^[107]。

皮肤的生物摩擦学:国内针对皮肤摩擦学的最新研究主要包括皮肤自身状态(解剖位置、年龄、含水量、皮脂含量、表面粗糙度等)、接触材料特性(表面粗糙度、亲水性/疏水性等)、介质(护肤品、清洁用品和药剂等)、接触压力、实际接触面积以及接触方式和速度等因素对皮肤摩擦行为的影响分析;摩擦引起的皮肤损伤机制及皮肤摩擦自适应性规律研究;通过摩擦过程中皮肤的机械信号(摩擦力、黏着力等)及生理信号(脑电波、皮肤温度、湿度和导电性等)等表征参量对皮肤摩擦感知的量化评估探索;皮肤角质层的摩擦及力学性能分析以及去角质化妆品和护肤品的评估;皮肤与假肢接受腔材料界面

的摩擦行为研究以及接受腔材料及残肢袜套的设计等^[108]。

（3）仿生摩擦学的最新研究进展。

仿生减摩与脱黏：通过对生物学体系减摩脱黏、减阻抗磨的研究，从几何、物理、材料、控制等角度借鉴生物体的成功经验及创成规律，中国科学院、北京航空航天大学、吉林大学、西南交通大学、华南理工大学、大连理工大学、东北石油大学、江苏大学等许多高校和研究机构围绕仿生摩擦学开展了大量的科学研究工作，并取得了一系列的成果。

北京航空航天大学张德远小组采用直接复制手段模拟生物表皮形貌，在鲨鱼皮的仿生减阻的研究上取得了新的突破，制备出的仿鲨鱼表面，最大减阻率达到 8.25%，表现出较好的工艺性和实用性；吉林大学的任露泉团队^[109]针对蜥蜴的减黏脱附特性展开了仿生学研究，仿蜥蜴体表的非光滑表面制造了犁壁和推土板，仿蜥蜴运动时体表电位的变化，设计新的电渗模面，取得显著的减黏脱附效果，从功能表面仿生角度，设计制作了凹坑型仿生形态汽车齿轮来解决齿面啮合区域磨损严重的问题，并通过对沙漠蝎子和沙漠红柳的体表形态、内部结构、化学成分和力学性能的研究，揭示了其对风沙冲蚀的主动防御功能和抗冲蚀磨损机理，提出耦合仿生理理论并用于仿生耐磨材料的设计制造；中国农业大学周强等对猪茅草捕虫笼内表面的超滑表现和表面微结构对其超滑性能的影响展开了研究，并进行了减摩脱黏仿生设计，取得了良好的效果；中国科学院兰州化物所的研究人员^[110]通过对材料的仿生结构设计，制备了具有优异性能的氧化铝/钼层状复合材料，在保持陶瓷良好力学性能的同时，实现了材料的结构/润滑功能一体化设计；东北石油大学的研究人员采用模压-滤取和高温真空熔渍工艺制备了自身发汗式仿生润滑多孔 CF/PTFE/PEEK 复合材料，考察了造孔剂、PTFE 的含量及碳纤维层间距对多孔 PEEK 复合材料结构和摩擦学性能的影响；大连理工大学的研究人员对仿生涂层表面形貌与磨损之间的关系进行了研究；江苏大学的研究人员基于蝗虫脚掌表面的几何形态和蝗虫脚掌屈肌腱的功能特性，提出了一种子午线轮胎胎面弧及带束层的仿生结构等。

仿生增摩与黏附：从壁虎等动物刚毛型脚掌的增摩与黏附技术的仿生入手，国内外研究了仿壁虎刚毛阵列的制备，探索了铸模法、刻蚀法、生长制造法等制备方法。铸模法是先合适的基体上制备微米-纳米直径和数百微米长的微孔，再把合适的材料浇注进去，然后再脱模得到所需刚毛阵列。刻蚀法是用机械、激光、化学等方法去除材料，留下仿生刚毛结构。铸模法和刻蚀法制备的刚毛阵列都没达到纳米尺度。基于自生长技术的仿生碳纳米管刚毛阵列（简称为 CNTA）的制备使得仿壁虎刚毛的干黏附材料和器件的研究与验证获得突破性进展。南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所戴振东团队研制了多种 CNTA。中国科学技术大学研究了刚性的纳米纤维与不可压缩的弹性面之间的接触模型。清华大学田煜小组制备了具有各向异性的多层碳纳米管阵列。南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所和中国科学院合肥智能机械研究所分别各自研制了可以在垂直墙面上运动的仿壁虎爬壁机器人。

三、国内外研究进展比较

我国摩擦学研究从 20 世纪 50 年代后期到 60 年代初为起步阶段，其后摩擦学的研究与发展不断受到各界重视。1962 年 10 月由中国科学院技术科学部和中国机械工程学会联合在兰州举办了“第一次全国摩擦、磨损和润滑研究报告会议”，有 160 多名专家与会，会议提议中国机械工程学会筹备设立摩擦、磨损与润滑分会。国际上著名的《英国教育科研部关于摩擦学教育和研究的报告》，又称《Jost 报告》，是 1966 年随着国际工业界对节约资源的关注而提出。此后，摩擦学作为一门交叉学科发展的重要性逐渐为世界各国同行广泛接受。中国机械工程学会摩擦学分会 1979 年成立，并成为亚洲摩擦学会轮值主席国、国际摩擦学理事会副主席成员国。

现在中国有超过 80 家的研究单位，超过 600 人的专业摩擦学研究队伍，有院士 8 人、长江学者 8 人、杰青 16 人、优青 8 人，在各个院校中有研究生 500 余名。有三个国家重点实验室，即清华大学摩擦学国家重点实验室、中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室和装甲兵工程学院再制造技术国家重点实验室。国内对摩擦学基础和应用基础研究的支持主要来自国家自然科学基金委员会、科学技术部、工业和信息化部和企业。近五年每年全国从国家自然科学基金委员会能获得 80 ~ 90 项左右，总额 3000 万 ~ 5000 万元不等的青年科学基金和面上基金。此外，国家自然科学基金委员会还在国家杰出青年基金、国家优秀青年基金、重点基金、重大研究计划课题等方面对摩擦学基础与应用基础研究进行资助。在 2011—2015 年，摩擦学研究领域获得国家自然科学基金委员会杰出青年基金资助 4 人，优秀青年基金资助 6 人。科学技术部和工业和信息化部主要从国家科技重大专项、重大基础研究专项等渠道对摩擦学应用基础和应用研究进行资助。在 2011—2015 年，中国摩擦学学者获得国际学术奖励和国家级科技奖励较多，例如，薛群基院士获得了 2012 年的国际摩擦学金奖，雒建斌院士获得 2013 年美国 STLE 国际奖。另外，有多名学者担任摩擦学国际学术期刊的主编、副主编和编委，例如刘维民院士任 *Tribology International* 杂志主编，雒建斌院士任 *Friction* 杂志主编，周仲荣教授任 *Biosurface and Biotriology* 主编，田煜教授任 *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* 主编。

下面主要从摩擦学论文发表与学术会议、摩擦学基础研究和工业摩擦学研究的进展等方面进行国内外对比分析。

（一）摩擦学学术论文与学术会议

1. 摩擦学学术论文

由于摩擦学与制造业的密切关系，它一直以来都受到国内外制造大国与强国的重点关注与研究。如图 1 所示，近年来摩擦学论文的发表主要都集中在经济发达的国家，如美国、日本、德国等，或发展中国家中的制造大国或地区，如中国、印度、中国台湾地区

等。日本的制造业一直受到世界瞩目。据统计，2012—2014 年日本在摩擦学方面发表的文献共 2257 篇，文章来自超过一百个研究单位，包括高校、研究所和公司的研究院，表明摩擦学在日本得到了广泛的关注。美国的摩擦学研究一直以来都非常活跃，研究人员分别来自高校、国家实验室、研究所和工业界。这是美国关于摩擦学的研究论文在世界上数量居于前列的原因。除了这些公开发表学术论文的摩擦学研究，还应该注意，美国针对国防成立了大量专门研究单位，其中有专门研究摩擦学问题的部门。以美国航空航天局（NASA）的格伦研究中心为例，其专门从事航空航天发动机的动力产生和推进问题研究。由于技术保密的关系，该研究中心发表的学术论文很少，但是随着一些研究报告的逐步解密，可以看到他们关于摩擦、磨损与润滑方面的研究报告非常全面、系统和深入。与之相对应，英国的罗尔斯·罗伊斯航空发动机公司在多个高校建立了联合研发中心。相比之下，我国的各个企业中少有专门从事摩擦学应用基础研究的机构，对行业中的一些共性机械表面界面基础问题缺乏深入的认识和理论指导下的实践活动。

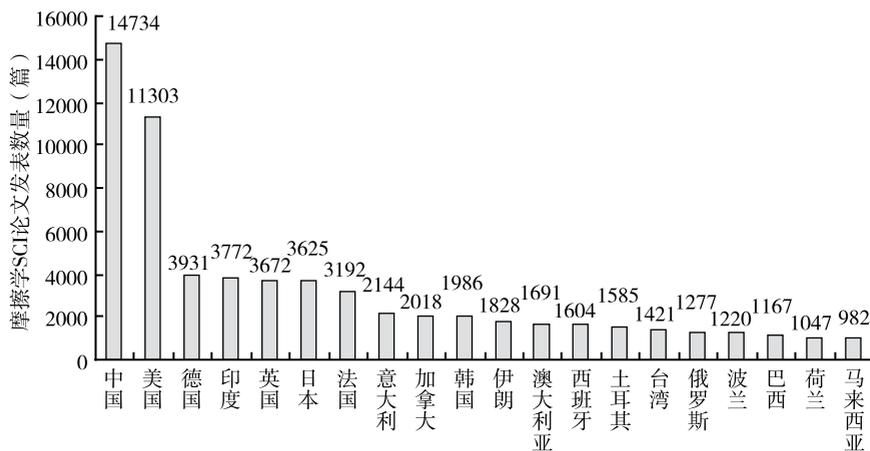


图 1 2010—2014 年世界各国的摩擦学 SCI 论文发表情况（排名 20 的国家/地区）

2. 摩擦学国际会议

国际会议的举办频次和参会人数在一定程度上可反映相关领域在国际上研究的热点程度。全世界有较多大规模或有影响的国际摩擦学会议定期召开，主要包括世界摩擦学大会（World Tribology Congress）、美国机械和润滑工程师协会摩擦学年会（ASME/STLE Joint Conference on Tribology）、美国润滑工程师年会（STLE Annual Meeting & Exhibition）、利兹-里昂摩擦学会议（Leeds-Lyon Symposium on Tribology）、国际材料磨损会议（International Conference on Wear of Materials）、中国-国际摩擦学大会（China International Symposium on Tribology, CIST）、以及日本国际摩擦学大会（International Tribology Conference, ITC）等。

世界摩擦学大会于 1997 年在英国伦敦召开第一届，其后四年一届，第六届（2017 年）WTC 会议将由中国摩擦学会主办在中国北京召开。该会议规模上千人，收录论文一千多

篇。国际摩擦学学术研讨会（International Tribology Symposium of IFToMM）由国际机构学和机器科学联合会（IFToMM）组织的高级别国际会议。该会议每2年举行一次，参会人数在300人左右，收录论文约200篇左右。

在北美地区，主要是美国机械和润滑工程师协会摩擦学年会和美国润滑工程师年会，前者已经举行了50多届，后者迄今已举办70届。前者每年举行一次，参会人数在600人左右。后者每年5月举办，每次会议交流约300篇论文；举行约10场针对工业界的培训讲座；70多个与摩擦学领域相关的仪器厂家参展，会议代表上千人。国际材料磨损会议，简称WOM会议，每2年举行一次，参会人数通常在300人左右。

在欧洲地区，利兹-里昂摩擦学会议是国际摩擦学领域规模最大、级别最高的国际会议之一，由英国利兹大学和法国里昂INSA学院于1974年发起的双边摩擦学会议，由这两个学校在每年9月轮流举办。每届参会人数在300人左右，论文收录近300篇。

在亚洲地区，亚洲国际摩擦学大会每4年举办一次，每届与会人数300人以上。中国-国际摩擦学大会由中国机械工程学会摩擦学分会主办，每3年一届，参会人数在300~500人。中国摩擦学大会每两年一届，参会人数400~500人；中国青年摩擦学大会每年一届，每届与会人数300人以上。日本摩擦学年会每年两次，春季会议通常在东京召开，参会人数500人左右，秋季会议参会人数300人左右。

在国际会议中发现，国外企业的研究人员针对其自身产品开展了大量的基础和应用基础性研究，对摩擦学基础理论与技术的最新发展高度重视。相比之下，国内企业很少派人参加各种国际和国内摩擦学会议。

（二）摩擦学基础研究

1. 摩擦理论

近年来，中国在层状二维固体材料的超低摩擦机理与实验研究、基于电磁场和表面分子结构与行为的摩擦调控和基于微纳米结构接触与剥离控制的黏脱附控制方面取得了较多基础研究成果，国外相对在这些方面开展的研究不多。随着物理、化学和力学等基础科学和实验技术的发展，关于摩擦起源与能量耗散/转移规律的理论研究已经深入到微纳米尺度，目前多用原子力显微镜等工具从分子以及原子的相互作用的角度来开展研究。通过不同探针扫描形式，根据探针与样品表面原子间的静电力、范德华力等作用力引起的悬臂梁形变，可绘制出固体表面的形貌图谱与作用势场的三维图谱。国外最新研制了非接触式纳米原子力显微镜（Nano-AFM），检测到氢键分子网络及键的位置、方位和长度，实现了对分子间键的真实空间识别和图像观测^[111]，对理解分子原子尺度的摩擦机理具有重要意义。Günter等利用探测原子由于原子间相互作用诱发的能级漂移作用吸附在高电子激发态的原子（里德伯原子）旁边，使原子团可以吸收探测光束，从而在投影面上形成阴影图像，实现了对量子态投影的持续空间观测^[112]，这种方法对研究能量传递中的多体动力学和微纳摩擦过程中的能量耗散具有重要意义。

在用原子级光滑的晶体薄片进行摩擦起源机理的研究中, Carpick 等测试了石墨烯、 MoS_2 、 NbSe_2 和 h-BN 等四种材料的单层或多层晶体薄片间的摩擦力, 发现其摩擦力不受薄片材料和实验方式的影响, 但随薄片晶体层数减小而增大。通过有限元模拟, 他们提出晶体薄片的厚度降低致使薄片晶体层在黏滑中更易形变, 影响了黏滑运动并导致摩擦力耗散加剧, 而摩擦力随材料厚度减小而增大在弱基底束缚的原子级厚度材料的摩擦中是普适的^[113]。

摩擦除与各类机械运动密切相关, 还与地震关系密切。国际上有若干学者在探索地震过程中的摩擦学机理。Fineberg 等通过光学方法检测聚甲基丙烯酸甲酯试样在摩擦滑动过程中实际接触面积的变化来反映界面断裂波的传播过程。当波前传播速度远小于瑞利波时界面应变基本符合线性弹性断裂机制模型, 但是当波前速度增大到接近瑞利波速时, 该模型则不足以准确描述未断裂部分的应变。断裂波前速度增大, 断裂能增强, 摩擦/黏滑接触界面的动力学过程最终都依赖于材料的断裂能, 可通过测量断层附近的应变来预测地震波扩展的速度和断裂能量^[114]。

另有研究认为滑动过程中界面有三种断裂模式: 低速断裂(速度远低于材料横波的传播速度), 亚-瑞利波断裂(地震中最为普遍的模式, 传播速度接近瑞利波传播速度)和超剪切断裂(传播速度超过横波波速 C_s), 通过高频声波传感器阵列检测花岗岩在黏滑过程中的波的传播, 结果表明当正应力大于一定值时才会发生超剪切断裂, 且超剪切断裂发生于初始剪应力和正应力比值小于 0.6 时^[115]。但实际地震中由于地层的粗糙表面、断层泥等填充物、摩擦发热导致的融化和矿物反应等因素都会减慢甚至抑制波的传播, 导致问题更加复杂。

关于摩擦力微观起源及能量耗散的研究仍有待继续深入开展。

2. 磨损机理与材料

磨损作为零部件失效的主要模式, 一直以来都是摩擦学研究的热点领域。目前, 国际上有关材料磨损的研究主要集中在以下三个方面: 磨损的原子级机制、复杂运动模式(如复合微动)或特殊工况下(如带电磨损)的磨损规律、耐磨涂层(如 DLC 膜)的磨损机制。

就磨损的原子级机制而言, 美国和欧洲的发达国家在微观磨损方法和技术方面处于前列。他们通过把扫描探针显微镜和高分辨透射电镜集成, 原位观察材料的微观磨损过程^[116-119]。国内在超光滑表面抛光中的摩擦化学磨损问题和纳米切削中的材料破坏问题开展了大量的微观磨损研究, 并基于摩擦诱导的原理发展出了一系列纳米制造加工方法。部分研究成果也被成功应用于半导体材料的化学机械抛光、微纳表面织构的加工以及金属或非金属的高精度表面切削等微纳加工领域。另外, 我国在减摩添加剂研究方面有些突破性工作。

在复合微动的研究方面, 由于复合微动试验较难实现, 针对复合微动的研究极少, 目前仅见英国学者 Briscoe 等^[120, 121]对扭转复合微动磨损行为进行过初步研究。他们通过试

验研究结合数值模拟,分析了不同加载下表面应变的演变。然而, Briscoe 等研究的材料过于单一,且并未涉及微动最危险的区域——混合区。因此,有必要对工业中常见的典型材料(如金属材料)开展系统深入的复合微动行为研究,以期进一步研究微动的运行行为和损伤机制,为抗复杂微动损伤的防护提供参考依据。

在载流磨损的研究方面,我国与国外研究有一定的差距^[122-125]。例如,电接触研究的薄弱导致我国各种控制器的可靠性低,平均无故障时间低于国外一个数量级。其原因在于欧美对于不同材料的电接触特性研究形成体系,对于材料变形与导电约束效应之间有成熟的模型。我们尚需从接触耦合的层面进一步探索载流摩擦的基本规律。此外,日本针对高铁不同速度振动特性有系统载流摩擦研究工作,而我国高铁受电弓结构与滑板材料与日本有明显的差距。

在 DLC 涂层的研究方面,欧美和日本等发达国家已开发出了一些碳基润滑材料应用于航空、汽车等领域,并通过拉曼和分子动态模拟等技术手段,提出了摩擦诱导结构转变^[126]和表面悬键钝化机制^[127]等来阐释碳基薄膜的低摩擦现象。国内关于 DLC 涂层方面的研究主要是采用一些新的技术来观察材料的摩擦磨损过程,例如采用显微拉曼技术表征 DLC 涂层在摩擦过程中的结构变化等手段来探究其超低摩擦磨损机制。部分成果已初步应用于一些发动机的柱塞、挺柱、活塞环等部件上,达到了节能减排的目的。

3. 润滑理论与技术

在传统的流体润滑理论方面,我国在某些特殊工况下的流体润滑成膜机理方面取得了一定突出成果,如青岛理工大学的郭峰等发现了热黏度楔和界面滑移导致产生的中央油膜凹陷及膜厚随载荷的增加的现象^[40]。国外开展传统的流体润滑基础理论研究方向的工作较少,其中有较大新意的为英国帝国理工的 Wong 等做的工作^[128]。这项工作通过激光激发掺杂低聚物聚丁烯荧光物质的润滑剂中的荧光,测量荧光形状和强度分布随着时间的演变来计算弹流润滑中的膜厚方向上的流动速度剖面。研究还发现在玻璃-液体的固液界面发生了严重的界面滑移,该滑移量随接触位置的不同而改变。此工作提出了对传统的弹流润滑的线性剪切假设的修正,对更好理解受限润滑剂的流变特性和更准确预测系统的摩擦学行为具有重要意义。

在液体超滑方面,清华大学雒建斌、张晨辉等人在这方面开展了大量研究,发现了基于磷酸体系、生物液体体系、基于酸与多羟基醇混合溶液的超滑规律和机理^[36-38];开发出高速摩擦润滑测试系统,可实现最高线速度 100 m/s 下的摩擦力测试以及最高线速度 42 m/s 下的润滑膜厚精确测量^[67];将拉曼光谱技术和膜厚测试仪相结合,利用偏振拉曼光谱峰强随激光偏振态变化的规律可以实现接触区润滑膜分子排列的在线观测。近期国外在这方面开展的研究工作相对较少。

液体润滑剂的分子结构与其流变学行为和润滑行为之间的关系一直是润滑研究领域的重要课题。与传统润滑剂相比,离子液体具有更好的减摩抗磨能力,但合成步骤复杂、成本昂贵、对基底具有腐蚀性以及与基础油相容性差,从而限制了它的实际应用。2001 年

刘维民等在国际上首次发现离子液体是一类性能优异的多用途润滑剂以来，该课题组对离子液体润滑材料进行了深入而系统的研究，并引起了相当多国内外科研人员的广泛重视。最近该课题组设计并制备了多个系列抗氧化防腐蚀、原位、绿色的离子液体，解决了离子液体的制备繁琐、成本高、氧化腐蚀、溶解性差等应用瓶颈问题。所设计制备的无腐蚀、溶解性较好的离子液体有望被发展为一类新型高性能的油溶性添加剂。美国橡树岭国家实验室 Qu 等把季膦盐离子液体添加到 PAO 和机油中，能有效地减少摩擦磨损^[129]。Antzutkin 等合成的硼酸酯离子液体不但具有较好的水解稳定性，作为 PEG 添加剂，具有较好的减摩抗磨性能^[130]。

在传统润滑剂的润滑机理研究领域，近期，Gosvami 等揭示了传统润滑添加剂二烷基二硫代锌（ZDDP）在摩擦副表面形成保护膜的微观机理^[131]。在高温下，用原子力显微镜对含有 ZDDP 的润滑油进行滑动摩擦，观察到了基于表面的片状摩擦反应膜的成核、生长与膜厚饱和过程。发现随着压力和温度的增加，膜厚增速增加，可以用热激发和应力辅助的反应速率模型来合理解释。虽然一些模型认为铁的存在催化了摩擦反应膜的生长，但是这个研究表明，反应膜的生长与基底或者针尖上是否有铁无关，而应力和热激发起到了非常重要的作用。

在摩擦的机理研究中，研究人员大量使用了石墨烯等二维材料，并发现在微纳米尺度石墨烯等表现出比较不同寻常的摩擦磨损性能，但是在工业摩擦学的宏观尺度上潜力尚未得到充分发挥。美国阿贡国家实验室研究小组报道了一个原子层厚的石墨烯涂层的非常好的宏观耐磨性能^[132]。研究使用钢对钢的销盘摩擦，在氢气环境下，石墨烯在钢的单层可以维持 6000 个滑动周期，而少数层石墨烯（3 ~ 4 层）则可维持 47000 个周期。在接触压力高达 0.5GPa 的恶劣条件下，钢表面基本没有磨损。计算仿真表面，这种很强的抗磨损能力主要来自石墨烯悬空键的氢钝化，增强了石墨烯的稳定性和石墨烯保护层的寿命。这表明石墨烯在宏观摩擦系统中可以起到很好的润滑与抗磨损作用。

固体润滑薄膜方面：国内外在固体润滑薄膜的设计、制备以及材料性能方面开展了系统的研究工作。针对空间运动部件润滑处理对高性能润滑薄膜材料的迫切需求，刘维民等采用 PVD 技术在轴承钢表面制备了掺杂金属元素的 WS₂ 基薄膜材料，系统研究了其在多种环境中的摩擦磨损机制以及在高湿度潮湿环境、原子氧辐照环境中储存时的氧化失效机理，建立并完善了 WS₂ 基薄膜微观结构与性能之间的关系^[87]。美国北德克萨斯大学 Scharf 等研究 Ti 复合 WS₂ 薄膜时发现，添加少量的金属 Ti 即可显著改变薄膜微观结构，有效地诱导薄膜结构致密化与非晶化，复合薄膜呈现出较好的摩擦学性能^[133]。

（三）工业摩擦学

1. 制造领域摩擦学

目前，国内外有关成形制造过程的摩擦学问题研究主要集中于摩擦磨损机理和摩擦力调控措施两方面。国内更多关注成形过程摩擦磨损机理研究，大量采用数值模拟方法研究

不同成形工艺参数下的摩擦状态，摩擦力对金属流动行为和工件表面精度的影响。国内西安建筑科技大学、上海交通大学等单位还开展了材料成形过程的摩擦效应分析和成形过程摩擦力测试系统开发。国外相关单位和企业非常重视塑性成形中的摩擦力控制技术，并在轻质高强材料精确成形、跨尺度难变形材料复杂构件成形中使用精确的摩擦模型进行工艺设计。

随着机械加工技术向超精密、超高速方向发展，传统的润滑材料和润滑方法已不能满足使用性能要求，建立在连续介质力学基础上的传统切削理论也不能很好地解释某些摩擦现象。近年来，硬态切削（以车代磨）、以钻代铣、高速干式切削等高效率、低消耗、少污染的机械加工工艺快速发展。国内外都很重视硬态切削过程中刀具磨损机理、切屑形成机理、切削力-切削热耦合机理、刀具磨损评估等方面研究。国外还非常重视高速干式切削的研究与应用，其中德国约有10%~15%的加工制造已经采用干式切削方法。干式切削方法在我国的工业应用中规模较小，干式切削理论研究方面和国外也存在较大的差距。

在表面制造摩擦学领域，我国学者在应用表面织构化、表面纳米化和表面涂层等技术提高材料摩擦磨损性能方面取得了大量成果。装甲兵工程学院、沈阳金属研究所等单位在表面涂层制备和表面机械处理成套设备开发中也有重要突破。国外已经开始大量使用激光淬火、激光冲击强化等高能束精密热处理技术来提高材料的强度和耐磨性。我国很多单位也开展了激光表面改性研究，但依旧受制于大型高功率激光加工设备核心器件依赖进口等问题。

在微纳米摩擦学领域，国外在原子、分子操作技术，摩擦诱导表面加工技术，微纳机械运动控制技术等领域都取得了重要进展。国内清华大学、西南交通大学等单位近年都大力开展了微纳制造摩擦学研究，中国机械工程学会摩擦学分会也组织成立了“微纳制造摩擦学专业委员会”。西南交通大学在微纳尺度下摩擦力起源、润滑膜失效机理、材料转移机制等方面取得了一系列理论成果。清华大学在超低压化学机械抛光技术和成套设备研究方面已达世界先进水平。

因再制造模式的不同，美国和欧洲国家的再制造企业主要采用“换件修理法和尺寸修理法”进行再制造，零件摩擦磨损损伤后，国外企业要么采用表面机械加工的方法恢复表面配合精度，要么直接报废更换新品零件。因此，国外企业很少对再制造对象的磨损失效机理和表面摩擦学改性方法开展研究。我国在再制造领域摩擦学研究中引领了学科发展前沿，主要研究内容包括废旧零件摩擦磨损机理，摩擦学性能优良的再制造材料体系，再制造成形层结构完整性破坏机制和再制造产品服役寿命预测等。我国还开展了再制造成形层磨损、疲劳状态监测技术和大型装备智能自修复在役再制造技术相关研究。

2. 陆地交通领域摩擦学

(1) 汽车摩擦学

我国学者为汽车发动机摩擦学发展提供了大批理论、方法与技术，并在国际摩擦学界占有一席之地。但摩擦学在汽车工业中没有引起足够的重视、相应基础理论研究深度不

够的问题也客观存在。近几年来,汽车面临日益增加的低碳化、低污染和高品质挑战,对汽车摩擦学提出了更高的要求。工业界开始认识到开展汽车摩擦学研究的重要性,针对汽车各个部分的摩擦学技术,发展的最快、研究的最多;但与国外相比,在下面几个方面仍然存在明显差距:① 缺少发动机摩擦学数据积累及其摩擦学设计平台、变速箱的摩擦学系统设计、降低行驶阻力为目标的摩擦学系统设计理论与方法研究。② 在摩擦学相关的失效机理和表面改性技术研究,尤其是表面处理技术的规模化应用与国外研究差距大。③ 在润滑油综合性能、新型代用燃料的应用中的腐蚀磨损行为等缺乏深入研究。

(2) 铁路摩擦学

我国铁路摩擦学,尤其是轮轨滚动接触行为、微动摩擦学和弓网摩擦学等方面,在国际上逐渐起到主导作用,但在诸多方面与国外还有一定差距。

我国在高速轮轨滚动接触行为数值模拟和轮轨材料损伤研究方面在世界前沿,而国外类似研究还着眼于较低速度。国内已研制了最高运行速度为 600km/h 的机车车辆滚动振动试验台、最高运行速度为 500km/h 高速轮轨关系试验台、高速轮轨摩擦磨损试验台、轮轨滚动行为模拟试验台、脱轨机理试验台等系列试验台,在高速列车轮轨黏着行为的数值模拟和室内试验研究方面达到了国际先进水平,但高速轮轨黏着状态线路试验方法、数值模拟、室内试验、现场试验和损伤抑制技术等方面落后于日本和欧洲。

针对高速铁路中的轮轴、电机轴过盈配合的微动损伤,国内开展了多种微动模式的研究,其基础性、系统性和深入性均领先于国外,并应用于指导我国列车轮轴的维护制度,而国外主要在应用部门开展一些应用性质的研究。国内还率先开展了针对转向架和轨道结构螺栓松动的微动摩擦学研究,国外尚未见报道。

在铁路弓网摩擦学研究中,国外学者开展低速弓网电滑动摩擦磨损研究较多,国内学者近年来逐步开展高速条件下的弓网电滑动摩擦磨损研究。2005 年后我国学者开展的研究占了发表文献的大多数。但总体来说,国内研究尚未形成完整的理论体系,应用研究较国外尚有一定差距。

3. 航空航天领域摩擦学

国内外在固体润滑薄膜的设计、制备以及材料性能方面开展了系统的研究工作。美国、欧盟、俄罗斯、日本等已开展了多次有关固体润滑材料的空间暴露试验,搭载于航天飞机(42 小时),搭载国际空间站(1~5 年)。我国 2008 年首次进行了固体润滑材料的空间暴露试验,约 43.5 小时。软金属薄膜在国外航天领域具有成功的应用,如离子镀 Pb 润滑的轴承,离子镀 Au 润滑的谐波齿轮,及离子镀 Au 基多层复合薄膜润滑的滚环等。国外制备的金基软金属薄膜寿命可满足国际空间站工况条件下 100 年的使用需求。瑞典 SKF 公司用磁控溅射制备了用于航空领域轴承重载、低摩擦性能要求的碳基润滑薄膜材料。国内具有自主知识产权的高性能特种润滑涂层材料的研发落后,缺少设计选材的技术基础、技术指导标准以及必要的工程化应用数据。例如,在涂层材料关键性能方面,美国军用标准 MIL-L-46010 就明确规定该类型高温固化型黏结固体润滑涂层在 4450N 负荷下

达到 450 分钟，承载能力可达 11120N，能通过 100 小时左右亚硫酸盐雾试验的防护能力，而国内只有少数几个产品能达到这一标准；在制备技术方面，国外已经开始采用先进的丝网印刷、机器人喷涂等，而国内大部分仍采用手工喷涂。

美国和欧洲的一些国家和地区的知名轴承公司在自润滑纤维织物衬垫材料研制、产品研发和基础研究等方面一直走在世界前列，其设计、工艺、设备、试验等技术水平整体超过我国，并已经形成明确的技术标准。国外相关研究部门如瑞典 SKF 轴承公司、德国 RWG 轴承公司、美国 Kamatics 公司等都具有成熟的自润滑衬垫及其产品，其产品的批次稳定性和性能稳定性非常优异。我国自润滑纤维织物衬垫材料的研究工作也取得了一定的进展。但是，与国外同类材料仍然存在一些差距：①品种单一，产量小；②使用范围窄；③表面处理技术有待提高；④试验技术积累不足，产品的评估和验证试验方法基本参考国外相关技术规定。

出于长寿命及高可靠性的考虑，空间机构用润滑油脂对产品性能要求主要表现在：优异的高低温特性、良好的低挥发特性、良好的润滑性能、优良的抗辐照特性、良好的表面润湿性能。同时满足上述条件的润滑油脂产品如前所述。在真空挥发损失指标上，国外同类产品其性能高出国内产品 3 ~ 5 个数量级。而低温特性，国外产品能够实现 -55 ~ 150℃ 下连续润滑，而国内仅具有一定温度范围内的润滑技术。国外满足不同使用工况条件的产品种类齐全，而我国产品种类非常少。另外，国内对空间润滑材料产品的性能探索不够完善，缺少空间条件下润滑油脂产品性能方面的研究，尤其缺少产品在空间条件下的环境适应性研究。

由于涉及技术秘密的原因，能够查到的关于国外空间活动部件摩擦学应用的公开资料较少，只能通过 NASA 较早的一些研究报告以及其他一些渠道得到空间活动部件摩擦学应用的部分信息。我国已在空间精密轴系长寿命润滑设计及应用技术方面取得突破性研究进展，但是在长寿命润滑工艺技术方面与国外先进航天国家存在一定的差距，国外先进航天国家已有成熟的润滑工艺处理技术，包括工艺处理控制措施、检验方法等，并且建立了相关标准和规范，我国缺乏相关标准和规范，工艺处理效果的检查技术不够健全。国内长寿命空间活动部件的润滑寿命缺乏有效的模拟实际工况的试验验证。

4. 能源领域摩擦学

在煤炭行业，国外研究不多，主要集中在钢丝绳微动损伤和疲劳计算方面，与国内研究内容近似。另外，国外对滚筒和截齿的研究主要集中在硬质合金头与齿体的安装配合工艺上。英国成功研究出了金刚石截齿，用金刚石片状毛坯构成每个截齿的切割刃，毛坯则是高温高压下钨基硬质合金与多晶人造金刚石结合形成。研究结果认为这种截齿耐磨效果好，适合于大型的滚筒采煤机和掘进机，但性价比不高。

石油开采及炼化领域由于技术保密的原因，关于石油开采、输送领域摩擦学研究的公开资料较少，从已有的资料上看，国外的研究主要集中在磨损机理研究和高性能新材料的开发上，且在相关方面已经有了较成熟的研究及应用。由于近期页岩气的蓬勃发展，开采

页岩气过程中涉及的摩擦学问题在世界范围内都是一个全新的方向，亟待发展。因此，石油开采及输送领域的摩擦学研究是目前急需开展的工作。

在核电源领域，国外在核主泵静压型机械密封摩擦学研究以法国普瓦捷大学 Tournier 等的研究比较有影响。国内的研究工作起步较晚，但经过近几年的努力，在密封摩擦副流固热耦合机理研究方面取得了较大进展，基本掌握了核主泵的工作机理和运行特性。其中，清华大学王玉明课题组对于核主泵机械密封的多场耦合机理、运行规律、参数优化、影响因素等研究是较为系统和全面。其研究成果在国内外具有一定的影响力，并且将有可能为核主泵国产化研制提供理论支撑。

在水润滑轴承方面，与国外发达国家相比，我国对基础理论研究重视不够，水润滑摩擦副研究领域，特别是多场多介质耦合条件下的摩擦、磨损与润滑机理及减振降噪方法方面，还有待进一步深入研究。

经过近 20 多年的快速发展，我国在风电设备设计、制造和润滑剂开发领域已经取得了显著成绩，但相对于丹麦、西班牙和德国等风电先进的国家还存在较大差距。目前国内研究主要集中在风电齿轮箱的优化设计、风电齿轮微点蚀机理和控制方法的研究、风电轴承受力分析及其模拟方法的建立、风电轴承微动磨损机理及其控制方法、风电轴承的优化设计及其在线故障诊断方法的建立、高性能长寿命风电润滑剂的开发和应用等方面。对于后者，国内中国科学院兰州化学物理研究所、中国石油天然气润滑油公司、沈阳奥吉娜等虽然已经展开了相关研究工作，也取得了阶段性成果，但依然未有成熟的产品进入市场。作为风电领域重要支撑的润滑剂核心技术依然被国外大公司所垄断。另外，国外已经开展高性能、可生物降解风电润滑剂的研究工作，德国 WinLub-2 研究协会针对海上恶劣环境开发出了高性能环境友好性生物质润滑油，其性能优于传统石油类润滑剂，且其产自于天然原料，无毒害性，能生物降解，可尽量减少对海洋生态环境的污染。

5. 海洋装备领域摩擦学

我国海洋装备技术目前明显落后于国外发达国家，深海采矿和通用技术尚停留在国际 20 世纪 70 年代水平。几家国际深海采油装备制造制造商（意大利 Saipem、美国 J. Ray McDermott 和韩国现代重工等），一直垄断着全球水深大于 300 米的海洋装备工程项目。国家深海装备生产企业制定了引进、消化、吸收和创新的发展思路，广泛开展深海相关的科学研究，依靠深海科技水平的提升推动我国突破深海装备研发的瓶颈。

锚泊定位和动力定位系统中关键部件既有腐蚀和磨损交互作用的问题，还有海水静压的激化作用，复杂的深海环境因素使得多数陆上摩擦学相关技术无法直接应用于深海。目前我国在深海液压元件、深海滑动轴承材料等这些关键部件上还有很大差距。虽然已有一些积累，但由于缺少深海摩擦学理论支撑和工作系统性，还没有自主的商品化产品，材料的使用寿命、性能稳定性等有待提高。

浮力调节系统是载人深潜器的关键技术之一，而高压海水泵是浮力调节系统的核心部件。满足大深度载人潜水器浮力调节系统的超高压海水泵的技术水平，在一定程度上反映

了一个国家海水液压技术与深海探测装备发展的水平。国外高压海水泵研制基本始于 20 世纪 60—80 年代，美国、英国、日本、芬兰、德国等国的研制水平居于世界领先地位。中高压海水泵在西方发达国家已经技术成熟，并形成了性能稳定的系列化产品。我国海水泵研制起步较晚，始于 20 世纪 90 年代，主要研制单位包括：华中科技大学、浙江大学、大连海事大学、西南交通大学、燕山大学等单位。更为环保、高效的全海水润滑液泵是国内外高压海水泵发展的主要趋势。

目前国内外有关超高压海水条件下材料摩擦学研究的报道还十分少见，并且市场上缺乏用于超高压海水条件下摩擦测试的专用设备。我国中国科学院兰州化学物理研究所和武汉材料保护研究所是目前国内外从事高压海水环境摩擦学测试设备研制并进行相关研究的活跃单位，一些相关的超高压海水环境摩擦学试验正在进行中。在高参数机械密封领域，包括深海环境中用机械密封，所有产品均被国外公司垄断，国内仅在中等参数下具有设计和制造能力，且使用寿命和可靠性与国外有较大差距。

作为海洋上的主要运输装置，船舰的内摩擦主要体现在船舰动力机械的关键摩擦副的耐磨与节能性能上，船舰外摩擦目前主要考虑船表面的防污与减阻等。在船舰防污方面，主要有化学方法、物理方法和生物方法三类主要防污技术。化学防污方法由于对海洋环境的污染、破坏而逐渐被淘汰，生物与物理防污方法成为当前的研究重点。但目前研究多以实验为主，还缺乏系统全面的基础理论和实船试验。同时，仅靠单一的微结构难以实现对多种污损生物发挥有效的防附着效果，未来的船舰防污材料表面设计应兼顾组分调控和结构设计，要充分发挥多元复合、纳米技术和仿生技术的协同防污优势。由于海洋污损生物的附着导致几乎所有的减阻技术的失效。防污可为船舰减阻技术的实现提供技术保障，船舰减阻是防污的终极目标。

6. 生物摩擦学与仿生摩擦学

在硬体生物材料摩擦学方面，英国、美国和日本等对人工关节的研究较早，研究范围广、研究深入，目前人工关节生产企业主要集中在欧美国家。我国起步较晚，但发展迅速。在新型材料的研发方面，已经不逊于国外研究机构，如中国矿业大学新型金属陶瓷材料。对人工关节材料的测试手段和改性方法，也逐渐向欧美靠拢，如上海交通大学研制的模拟器及北京科技大学的模拟器可以实时监测材料的磨损和腐蚀参数，清华大学采用的关节材料改性方法可显著提高钴基合金的耐摩擦腐蚀性能等。但是我国目前缺乏骨科医生和基础科研工作者的沟通渠道，信息不对称，我国人工关节企业对新材料研发和监测不够重视，这在很大程度上限制了人工关节生物摩擦学的发展。此外，牙齿磨损得到越来越多人的关注，美国和欧洲等发达国家在牙齿磨损、考古学和物种进化方面的应用和牙科材料摩擦学性能改进方面的研究比较多。国内主要采用体外模拟试验和微纳米摩擦学研究手段，针对人体天然牙微观结构与摩擦学性能之间的构性关系、人体天然牙和牙科修复材料的摩擦磨损机制、种植牙的微动损伤等问题，开展了大量的实验研究。

在软体生物材料摩擦学方面，探索天然关节软骨及仿生软骨的润滑机理以及液相承载

润滑是生物摩擦学领域研究的一个重要内容，国外的研究者对关节软骨进行了大量的实验研究及理论模型研究，通过对关节软骨进行宏观测试和微观尺度上研究，建立了相关模型及理论；通过各种研究增强仿生软骨的力学性能和摩擦学性能；国内的研究进展缓慢，没有深入的分析以及建立相关模型，没有研发出高力学性能的仿生软骨，且基础理论研究薄弱。皮肤具有非均匀性、各向异性和非线性的黏弹特性，在与外界的接触行为中表现出较为复杂的力学特性。国外在皮肤摩擦学接触机制的基础理论方面研究较多，应用方面主要是生活用品、化妆品和纺织品的设计。国内研究重点主要在皮肤摩擦引起的损伤及自适应机制方面，应用背景主要是假肢矫形器的设计。此外，国内还对皮肤的摩擦感知能力进行了量化评定，主要应用是生活用品、假肢矫形器、组织工程化皮肤和机器人皮肤的设计。

在仿生摩擦学方面，因其研究的前沿性、实用性和多学科交叉的特点，目前已成为摩擦学的重要研究前沿之一。在仿生材料方面，主要改变材料的几何形态和成分及组织来研究仿生耐磨材料，研究深度和广度还有待进一步加强。同时，对生物材料表面结构特异性的科学内涵尚未有较为清晰的认识。在仿生摩擦学的研究对象方面，国内学者多停留在从自然界的其他生物身上获取灵感，而国外研究人员已将目光更多地投向了人——这一自然界最高等的生物身上，尤其是在对人体皮肤、关节和牙齿等的仿生摩擦学方面开展了大量研究工作。虽然国内仿生摩擦学研究起步较晚，但随着一大批中青年科研工作者的加入，相信在不久的将来我国仿生摩擦学研究将会得到迅速发展。

7. 基础零部件

要实现我国制造业水平由量的突破到质的提升，完成从“制造大国”向“制造强国”的转变，必须大力推动高档数控机床、重型锻压设备、精密铸造设备等工业基础装备的发展，这些工业母机大多工作于高速、高温、重载工况，超强的耐磨性能和可靠的润滑措施是保证其活动部件服役寿命和运行精度的关键。如我国制造、地面交通、能源、航空航天、海洋、生物等行业中存在大量的摩擦学问题有待解决，其解决程度直接影响到这些行业中重大装备的服役性能。在很多重大装备中，除了一些特色高难度零部件，很多与摩擦相关的基础零部件严重影响了整个装备的性能、可靠性与寿命，我国在这些基础零部件的设计与制造方面与国外相比有一定差距，是将来一个时期我国摩擦学研究亟需解决的重要问题。

（1）轴承

高端轴承是指高性能、高可靠性、高技术含量，能够满足高端设备或武器装备等极端工况与特殊环境要求，对国民经济和国家安全具有战略意义的轴承。高端轴承是尖端国防装备的关键基础部件。能源、高速轨道交通、汽车、船舶、石油化工、天然气输送和盾构机等重要装备都离不开轴承。航空轴承的对外依赖程度很高，航天轴承虽然能够实现自己生产，但是寿命与国外有很大的差距。我国核电（国内主流的二代技术，正在建设的 AP1000 三代技术和高温气冷堆四代技术）中“心脏”设备——主泵的轴承仍依赖进口。高铁轴承目前是 100% 进口。精密机床主轴轴承也被外国著名公司所垄断。高端汽车轴承市场占有率也很低。我国高端轴承技术与国际先进水平的技术差距主要体现在先进的材料

体系、可靠的设计和验证手段、配套的轴承零件表面特种处理和改性技术、精准制造工艺和技术等方面；对国际高端轴承领域在结构集成化设计制造、智能化、免维护或者视情维护等相关发展趋势，国内才刚刚开始研究，这些都是将来研究中需要解决的问题。

（2）密封件

密封件防止流体或固体微粒从相邻结合面间泄漏以及防止外界杂质侵入机器设备内部，是保证现代工业高效、长期、安全和稳定运行的重要技术产品，是航天飞机、大功率飞机发动机、深海机器人和特大型盾构机等高新技术装备必不可少的重要基础件。随着我国经济快速增长，密封件制造业一直保持两位数的高速增长。中国橡塑密封件企业规模偏小，技术水平偏低。欧盟提高并建立新的欧洲密封质量标准取代以前依赖美国流体协会制定的系列标准。在新的欧洲密封质量标准中出现和强调泄漏率。欧洲已经出现了泄漏率达 10^{-4} mg/s级的高强石墨复合板，我国产品泄漏率一般在 10^{-1} mg/s级。我国多数企业科技人员技术力量薄弱，缺乏相应的开发和改造能力，内部工艺文件、质量控制计划或作业指导文件及设备管理文件等与国际水平相距甚远。在密封件中使用新型材料、先进传感技术和控制技术以及现代设计理论与方法是将来密封件研究发展的重要趋势。

（3）摩擦片

摩擦材料广泛用于各种交通运输工具（如汽车、火车、飞机、舰船等）和各种机器设备的制动器、离合器及摩擦传动装置中。随着汽车工业和高速铁路的发展，其刹车制动装置的使用条件也越来越苛刻，国内外科研工作者都在努力研制开发高性能刹车片材料，以满足市场要求。随着初期从使用棉花纤维或其织品浸渍橡胶浆液，到耐热性好的石棉摩擦材料，到无石棉的半金属摩擦材料、少金属型摩擦材料、陶瓷型摩擦材料，摩擦材料发展迅速。高性能碳/碳复合制动材料是一种以碳为基体碳纤维增强的新型复合材料，质量轻、模量高、比强度大、热膨胀系数低、耐高温、耐热冲击、耐腐蚀、吸震性好。碳/碳复合材料以前主要用于飞机制动器，近年来逐渐用于高速铁路。德国 KnorrBremse 公司研制的一种碳纤维复合材料制动器，其吸收的制动能高达 100MJ。法国碳工业公司制造的碳纤维复合材料能在 1000℃ 的高温下工作，目前已经在 TGV-A 上得到应用。日本新干线 270km/h 电动车制动系统也采用了碳纤维增强材料。我国在高性能碳/碳复合材料制动刹车片研发上已有一定基础，但是高质量的摩擦材料仍然是巨大挑战。

（4）螺栓

螺栓是典型的常用机械零件，广泛应用电子产品、电力设备、船舶、车辆、建筑、桥梁等日程生活和工业中。先进螺栓是高端机械装备和制造的重要基础，带给关键构件和装备的附加值很高。目前国内一些中小型螺栓企业大量制造普通标准件，中国螺栓的生产技术水平目前基本接近世界先进水平，主要为普通标准件及低、中档次的特种、异型螺栓，量大价廉，但高精度、高强度螺栓有一小部分仍需进口，缺乏从技术服务到解决机械紧固方案的提供。在产品上，中高端产品将加速对设计、制造、包装、运输、使用到报废处理的全过程考虑。在流通方面，探索各种增值服务的模式，从提供单套螺栓到提供机械紧固

方案、定制服务、远程监测等服务。通过对螺栓紧固与松动的机理深入研究研制高性能螺栓，并提供增值服务是其近期发展的重要趋势。

8. 润滑材料

（1）液体润滑

从整个润滑油 / 脂市场上来看，目前我国高性能润滑脂产品的种类和数量较少，而且国产润滑油、脂性能还远低于国外产品。在重载、高速、高温等苛刻服役工况下，我国现有的润滑材料已不能满足运动系统高可靠、高效率、长寿命运行的要求，如我国民用航空、风力发电机组、高速列车、钢铁工业等装备用润滑油脂 90% 以上依赖进口，汽车发动机用高附加值润滑油也大多为国外跨国公司所垄断，而发展这些润滑油脂的技术核心是以酯类油为代表的高性能合成润滑材料的设计、制备与应用。主要表现在：①合成润滑材料在某些使用性能方面如耐高低温、承载能力、减摩性能等与国外知名品牌产品相比还有较大差距。②高性能润滑油脂是由高品质基础润滑油及高性能润滑添加剂经过科学复配而获得的润滑材料产品。目前我国的高性能抗氧化添加剂、摩擦改进添加剂、抗极压、抗磨损添加剂等还主要依赖进口。③国外大公司已经系统掌握了合成润滑材料对轴承、齿轮等性能的影响因素，并不断探索增效延寿技术方法。我国在该方面起步较晚，航空发动机主轴轴承寿命只有国外的 1/3、传动系统等轴承也只有国外的 1/2，其中制约因素之一就是重载高温环境下的润滑材料和润滑方法，因此需要开展系统深入的研究工作以揭示其影响机制并验证其使役性能。

（2）固体润滑

在汽车各类固体润滑膜的基础与应用研究方面，国际上汽车发动机领域正在探索应用高性能固体润滑薄膜技术满足启停状态下对润滑抗磨的苛刻要求，在下一代汽油机的全铝发动机缸套上开发类似“Nanoslide”的固体润滑膜前沿技术，以满足汽车工业对节能和环保的要求。例如，国外在传统的汽车发动机和动力传动系统上开始采用 DLC 固体润滑新技术，我国实际水平与国外有 5 ~ 10 年的差距。

在碳基薄膜应用探索研究方面，目前针对航空、汽车发动机部件在贫油、断油条件下，因缺少完整润滑油膜而导致摩擦卡咬合磨损的问题，利用含有大量极性基团的润滑油与化学惰性强碳基薄膜复合润滑技术，增加碳膜的边界润滑特性，国外多家研发机构已开展了相关工作并取得进展。例如，在汽车工业发动机部件碳膜润滑材料研究方面，德国 Bosch、比利时 Bekeart、法国 Sorei 涂层公司（一级方程式赛车和 NASCAR 赛车发动机配件供应商）、英国 Tecvac 等大型公司研发机构，分别采用磁控溅射、等离子体增强化学气相沉积、阴极真空电弧沉积等技术，在柱塞、挺柱、曲轴、活塞环、喷嘴等部件上制备了含氢碳膜、不含氢碳膜、Me-DLC 碳膜及多层梯度复合碳膜润滑材料，发现碳膜可极大降低部件的摩擦损耗，提高燃油效率，减少 CO₂ 排放。国内在此方面的工作目前刚刚起步，研究工作极具挑战性同时又具有重要的理论意义和应用价值。

国外大型石化公司，如美孚（Mobil）、壳牌（Shell），国际知名润滑油脂专业制商，

如克鲁勃（Klueber）、福斯（Fuchs），以及润滑油脂添加剂，如路博润（Lubrizol）、雅富顿（Afton）等，深知科技研发与技术创新对润滑材料产业的重要性，每年投入大量的人力物力用于新型润滑材料的开发及润滑技术的创新。美孚每年在润滑材料领域科技投入超过 60 亿人民币，超过 600 名科学家服务于润滑产品的技术与创新。壳牌每年在润滑材料领域科技投入达 80 亿人民币，在全球拥有三个研发中心，550 名科学家服务于润滑产品的技术与创新。克鲁勃每年在特种工业油脂方面科技投入超过 3 亿人民币，超过 150 名科学家服务于润滑产品的技术与创新。福斯润滑油每年在润滑油脂领域科技投入超过 10 亿人民币，在全球拥有 40 多个专业实验室。路博润每年在润滑油添加剂领域科技投入超过 30 亿人民币，拥有 500 余名科学家服务于润滑添加剂的技术与创新。雅富顿每年在润滑材料领域科技投入达 12 亿人民币，超过 300 名科学家服务于润滑产品的技术与创新。上述企业在我国境内均建立了技术研发中心，对中国本土高端润滑油脂的发展造成了严重冲击与限制。

四、发展趋势及展望

（一）摩擦学基础理论

1. 摩擦机理

摩擦在微观的界面上发生能量耗散，导致宏观的热、力、振动、噪声、电磁辐射等多物理场现象。所以摩擦现象是摩擦副材料及界面的跨尺度特性共同决定的，微观分子、原子尺度的接触和作用需要与宏观材料的力学特性结合，建立跨尺度物理模型，才能系统全面揭示宏观摩擦学现象与微观原子、分子尺度的表面界面作用的联系。通过理论与实验研究微观尺度摩擦的能量耗散与转移规律、稳态和非稳态运动过程中摩擦力与界面剪切强度、真实接触面积与载荷之间的定量关系，仍然是摩擦机理研究中的重要问题。在从边界润滑到弹流润滑的润滑状态改变过程中，对润滑分子与机械表面界面的相互作用规律，各种沉积膜、吸附膜在固体表面的构型和构性关系；纳米液体薄膜在固体表面和外载作用下的结构、相变和流变行为；分子润滑膜的剪切强度、承载极限和界面滑移等规律及定量描述仍然有待深入研究。

2. 磨损机理

综合国内外的研究现状，磨损机理的研究希望在以下几个方面取得突破。微观磨损：材料的原子级去除机理、材料的低损伤甚至无损伤去除机制，以及磨损过程量化模型的构建；复合微动磨损：特殊工况（如高温、气体、介质）条件下的微动磨损机理、微动磨损过程原位实时观察及有限元模拟。摩擦材料：摩擦材料的耐磨损机理、摩擦性能与结构的构性关系，以及摩擦材料的轻量化和环保设计。带电磨损：接触表面属性对载流摩擦特性控制的物理机制、摩擦副导电品质恶化的控制，以及摩擦过程中电弧产生、发展的动态演变规律。碳基薄膜磨损：磨损过程结构成分的实时监测、摩擦界面的无损伤处理，以及摩

擦磨损性能与薄膜结构成分理论模型的构建。

3. 润滑理论

在合成高性能润滑剂的研发过程中,通过探讨分子结构与产品性能之间的关系规律,指导分子结构的设计,改进制备工艺,严格控制产品性能,达到国外或超过同类产品的水平^[72]。新型高性能润滑剂的开发工作需要加强,如离子液体用作高性能润滑剂存在氧化性、腐蚀性和作为添加剂与基础油的相溶性差等不容忽视的问题,希望通过分子设计来解决。开发绿色环保含硼、氮添加剂、绿色油溶性离子液体添加剂、分散性好的纳米颗粒添加剂。

未来固体润滑材料朝着耐高温、高压、高速等苛刻条件,并与纳米技术结合,实现微观尺度的润滑等方向发展。通过掺杂、过渡层、功能梯度、超晶格以及纳米复合薄膜等方法来解决如内应力、结合力、稳定性等问题。借助纳米多元组分、界面结构、表面织构化的主动设计,研制具有多环境适应性(智能)的润滑薄膜。此外针对这些新型固体润滑材料和薄膜,系统研究相关的摩擦磨损机制。

固-液复合润滑比单一的液体润滑或固体润滑具有更好的摩擦学性能,但是也存在一些问题:①固液复合润滑油匹配性有要求,在某些情况下,润滑油脂可能加速固体润滑涂层的磨损。②修饰液体润滑剂或者固体薄膜,使得液体润滑剂在薄膜上能很好铺展,也可以制备出织构表面,让液体润滑剂能长期储存而不被零部件运动甩出去。③固液复合润滑不同于单一固体润滑或液体润滑的摩擦磨损机制,应该深刻探索其中的摩擦学机制与理论。

(二) 工业摩擦学发展趋势

1. 制造领域摩擦学

第一,“智能制造”会促进摩擦状态监测技术和在线智能自修复技术的发展:在“智能制造”中,无人化智能生产线上有大量摩擦部件的运转状态不稳定或过度磨损,这将严重影响产品的制造精度及生产过程。所以,智能制造系统中的摩擦运转部件须具有自主监测、自我感知的传感预警单元,以便进行“视情维修”。摩擦状态监测技术和智能传感技术将获得极大发展。此外,能够在运行过程中确保配合精度和接触状态稳定的智能自修复、在役再制造技术将受到广泛应用。

第二,“精密制造”技术对微/纳摩擦学提出更高要求:超精表面制造、微纳表面工程等技术对制造的特征尺寸(精度、运动副间隙、表面粗糙度及运动精度)要求常达到纳米量级。微/纳摩擦学研究亟需解决微/纳米尺度下摩擦力的形成机理、材料的黏着和去除机理、原子团迁移机理、摩擦过程中的物理化学效应等基础科学问题,以保障微纳米结构制造、纳米精度加工、纳米级精度的运动控制等超精密制造技术的快速发展。

第三,“绿色制造”的发展迫切需要“绿色摩擦学”的支撑:针对资源能源短缺和生态环境破坏的全球性危机,必须在制造过程中关注摩擦磨损造成的能源消耗和材料损耗,

废水、废渣和噪声等环境污染。新型高性能润滑材料研发、摩擦学部件延寿、环境友好型润滑材料和绿色润滑技术开发、摩擦磨损噪声、振动控制等“绿色摩擦学”相关科学技术将在未来的“绿色制造”中发挥重要作用。

2. 地面交通运输领域摩擦学

第一，加强地面运输装备关键摩擦学器件的应用基础研究：对发动机缸套活塞、轮轨、制动盘片、弓网等特殊摩擦学系统，开展极端服役工况下的多场耦合作用材料损伤行为和机理研究；针对汽车和列车中各种机械连接，如螺栓连接、铆接、球窝连接、过盈配合、间隙配合、花键配合、榫槽配合等复杂结构的失效及防护的摩擦学设计方法。

第二，加强陆地交通的材料匹配、升级，以及表面工程防护、润滑设计等方面的基础和应用基础研究，以及表面织构、摩擦噪声等新方向的基础研究，大力促进技术开发研究，实现新材料技术的规模化应用；

第三，加强地面运输装备中摩擦学系统的状态检测方法和技术研究，提高系统的舒适性、安全性和服役可靠性。

3. 航空航天领域摩擦学

第一，系统开展典型工况条件下的空间机械运动部件的摩擦学研究，发展高承载、长寿命固体自润滑薄膜/涂层材料、固体自润滑聚合物及金属基自润滑复合材料与相关润滑技术依旧是固体润滑材料的研究方向。液体润滑剂是未来航空航天用润滑材料的研究方向之一，我国在空间液体润滑领域尚需积极开拓。此外，可积极开展固体-油脂混合润滑技术研究。

第二，必须模拟航空航天工况建立大尺寸空间、超高真空（ 10^{-7} Pa）、高低温（ $-196 \sim 300^{\circ}\text{C}$ ），射线辐照（粒子束、原子氧和紫外光）等空间环境模拟的摩擦测试功能。探讨地基实验与空间运动部件实际润滑效果及寿命的相关性，建立空间润滑材料与技术的实验和使用规范。

第三，根据不同的工程实际要求，针对性地研究和发展航空航天润滑剂和新技术。例如，在空间环境生产高纯材料和原位制备润滑剂薄膜、具有良好润滑性能的高温超导材料应用于空间环境电接触材料及结构。

4. 能源领域摩擦学

第一，能源装备中的高载、高温、高固体颗粒、腐蚀环境等使得工件的磨损较一般工况严重，橡塑类材料应用越来越广泛，所表现出的微动损伤、冲蚀磨损、软磨硬现象等问题日益突出，为保障装备的长期和高可靠运行，表面强化与减摩耐磨技术仍然有待继续发展，对于其磨损失效机理和防护设计有待系统深入研究。

第二，核电等能源装备中轴承、密封等摩擦副的润滑失效分析和设计非常复杂，高温（低温）是典型的润滑失效特征，除了传统的流、固、热多场耦合分析外，需深入考虑润滑表面形貌、界面相变、空化以及表面材料高温特性等因素的影响。

第三，煤炭、风电等大型能源装备要求长周期、高可靠性运行，其中轴承、齿轮等摩

擦副长时间运行于重载、变温等苛刻工况和高湿、高盐、高颗粒污染等使用环境，需要研究耐用性、环境友好型润滑材料和添加剂、新型摩擦材料，以及这些基础部件的摩擦学设计理论和寿命预测与评估与装备的寿命与安全相结合。

5. 海洋装备领域摩擦学

第一，研制新型海洋环境模拟试验平台，实现对多元苛刻海洋环境的实验室模拟，为海洋装备材料、表面防污减阻形貌等的研制以及海洋装备设计理论创造符合真实海洋环境的实验室条件。

第二，研究在海洋特殊环境条件下，关键部件中摩擦副、气固和液固两相接触表面的摩擦磨损机理和特性。研究并应用各种新型抗磨材料以提高海洋装备的运行可靠性和全寿命寿命；研发适应海洋环境的新型无污染减阻防污涂料和各类仿生防污减阻形貌，优化海洋装备的环境适应性能。

第三，开展海洋环境、海洋工况下海洋装备的工作性能，以及各关键部件的苛刻环境摩擦性能评估与研究，从各个摩擦节点入手，最大程度上降低系统能耗以提高能源与海洋设备的利用效率，通过试验积累、理论分析等手段逐步建立和完善海洋摩擦学理论体系。

第四，以基础摩擦学理论为依托，综合海洋水文学、海洋气象学、海洋物理学、海洋化学以及海洋生物学等相关学科，建立多元苛刻环境下多学科耦合理论与技术，研究并实施海洋装备节能、减摩、降耗的管理策略，服务于海洋装备。应用和推广基于可监测性设计理论的海洋装备实时状态监测、自修复等技术，提高海洋装备智能化水平。

6. 生物摩擦学与仿生摩擦学

第一，硬体生物材料的摩擦学。进一步降低磨损微粒的产生及其毒副作用是提高人工关节使用寿命的关键；采用表面接枝改性等相关技术实现超低摩擦、磨损性能，探讨磨损微粒毒副作用的药物抑制机理，以及阐明金属纳米磨屑的腐蚀机制是未来重要的发展方向；将生物力学、生物摩擦学、稳定性固定等研究进行耦合，建立人工关节持久固定的方法，优化满足骨再生条件的人工关节结构设计，也是本领域的重要发展趋势；牙齿摩擦学应强化人体天然牙结构与摩擦学性能的构性关系，牙齿在复杂受力工况下的损伤与自我修复机制，不同哺乳动物牙齿摩擦学行为差异及仿生设计。

第二，软体生物材料的摩擦学。对高强度、高韧性水凝胶及其他生物相容性良好的材料在人体生理载荷下的摩擦、磨损性能及其与软骨 / 成骨细胞相互作用机制的研究是软体生物材料摩擦学在本领域的一个重要发展方向。皮肤摩擦特性的研究未来主要将宏观和微观尺度上的研究结合，揭示不同皮肤层的各向异性力学性能及其对摩擦行为的影响，实现接触过程中面积和形变的精确测量与理论描述。

第三，仿生摩擦学。仿生系统普遍存在能耗大、续航时间短、安全稳定性低的缺点，生物系统的冗余约束机制对生物体黏附的稳定性、运动的灵活性和机动性的影响是未来深入研究的方向。同时具有增摩、高黏附和易脱附特性的新型仿生材料的研究与应用，也是未来的发展趋势。在机理研究方面从宏观现象的描述向着更微观机理揭示方向进一步发

展,功能再现方面结合仿生摩擦学自身的需要,进一步融合、整合、创新各种制造技术,研究方法和策略方面充分考虑界面效应、尺度效应、环境效应、生物自适应等,结合进化论、纳米摩擦学、生态摩擦学等理论完善仿生摩擦学理论。

(三) 政策建议

1. 进一步加强及推广工业调研

在以往工作的基础上,扩大摩擦学工业调研的范围,加强对新兴产业及中小企业的调研力度。调研摩擦学技术和知识在工业中的推广和应用情况,对能源消耗和环境的影响,提炼出工程实际中亟待解决的摩擦学关键问题,以此指导摩擦学基础及应用研究的发展方向。

2. 加强摩擦学教育与知识普及

为适应中国制造强国的建设,必须进一步加强摩擦学知识的广泛普及以及相关专门人才的培养,为工业的发展做好人才培养和储备工作,同时为企业服务技术人员培训提供良好的条件。建议从以下几方面开展工作:①针对工业界需求,面向各行业加强应用型、创新性人才培养,在企业与工厂等机构持续地有计划地开展摩擦学相关技术人员的培训工作。②在高等院校机械类本科专业开设摩擦学相关课程,广泛普及摩擦学基本知识,加强摩擦学专业研究生的专业知识及科研能力的培养,并鼓励参与国际交流与协作。③大力关注摩擦学青年学者的成长,鼓励青年学者积极参与国际合作,建立多元化、人性化的评价体系,给青年学者提供相对宽松的成长环境。

3. 加强协同创新体系的建设

加大对高等院校、科研单位、工厂企业之间开展协同创新工作的支持力度,建立保障协同创新工作顺利开展的相关机构,并完善相关机制。鼓励并加快摩擦学新技术新方法在工业界的推广与应用,进而推进前瞻性和前沿性的交叉研究工作的开展。增加高等院校、科研单位及工厂企业之间的交流与合作,增加联合实验室、研究院及产学研基地的数量,并建立战略性国际合作联合研究基地。建立有效促进高校、科研单位、企业间技术人员交流的互聘合作机制。

4. 加强摩擦学相关的节能与环保标准及法规的制定

针对当前国内全行业内摩擦学设计及相关技术标准缺乏的现状,建议集中力量制定摩擦学设计标准手册,完善对润滑剂、零部件材料等关键问题的设计标准,实现全行业内摩擦学设计的标准化体系。同时完善与节能、环保相关的法规条例制定和实施细则,加强对企业相关设计产品的监管力度,例如油品及摩擦材料的排放等标准。

— 参考文献 —

[1] 谢友柏,张嗣伟.摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究[M].北京:高等教育出版社,2009.

- [2] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告（2010–2020）. 北京：科学出版社，2010.
- [3] Wang L F, Ma T B, Hu Y Z, et al. Atomic-scale friction in graphene oxide: An interfacial interaction perspective from first-principles calculations [J]. *Physical Review B*, 2012, 86:125436.
- [4] Wang L F, Ma T B, Hu Y Z, et al. Uperlubricity of two-dimensional fluorographene/MoS₂ heterostructure: A first-principles study [J]. *Nanotechnology*, 2014, 25:385701.
- [5] Zhang R H, Wang L P, Lu Z B. Probing the intrinsic failure mechanism of fluorinated amorphous carbon film based on the first-principles calculations [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:9419.
- [6] Zhang R F, Ning Z Y, Zhang Y Y, Zheng Q S, et al. Superlubricity in centimetres-long double-walled carbon nanotubes under ambient conditions [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8:912–916.
- [7] He S Q, Meng Y G, Tian Y. Correlation between adsorption/desorption of surfactant and change in friction of stainless steel in aqueous solutions under different electrode potentials [J]. *Tribology Letters*, 2011, 41:485–494.
- [8] Yang X Y, Meng Y G, Tian Y. Effect of imidazolium ionic liquid additives on lubrication performance of propylene carbonate under different electrical potentials [J]. *Tribology Letters*, 2014, 56(1):161–169.
- [9] Wei Q B, Cai M R, Zhou F, et al. Dramatically tuning friction using responsive polyelectrolyte brushes [J]. *Macromolecules*, 2013, 46(23):9368–9379.
- [10] Wu Y, Cai M R, Pei X W, et al. Switching friction with thermal-responsive gels [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2013, 34(22):1785–1790.
- [11] Wu Y, Pei X W, Wang X L, et al. Biomimicking lubrication superior to fish skin using responsive hydrogels [J]. *NPG Asia Materials*, 2014, 6(10):e136.
- [12] Tian Y, Pesika N, Zeng H B, et al. Adhesion and friction in gecko toe attachment and detachment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(51):19320–19325.
- [13] Tian Y, Wan J, Pesika N, et al. Bridging nanocontacts to macroscale gecko adhesion by sliding soft lamellar skin supported setal array [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3:1382.
- [14] Zhou M, Tian Y, Sameoto D, et al. Controllable interfacial adhesion applied to transfer light and fragile objects by using gecko inspired mushroom-shaped pillar surface [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2013, 5:10137–10144.
- [15] Li J, Chai Z M, Liu Y H, Lu X C. Tribo-chemical behavior of copper in chemical mechanical planarization [J]. *Tribology Letters*, 2013, 50:177–184.
- [16] Zhao D W, He Y Y, Wang T Q, et al. Effects of the polishing variables on the wafer-pad interfacial fluid pressure in chemical mechanical polishing of 12-inch wafer [J]. *Journal of Electrochemistry Society*, 2012, 159:H342–H348.
- [17] Li J, Liu Y H, Lu X C, et al. Material removal mechanism of copper CMP from a chemical-mechanical synergy perspective [J]. *Tribology Letters*, 2013, 49:11–19.
- [18] Cheng J, Wang T, Mei H, et al. Synergetic effect of potassium molybdate and benzotriazole on the CMP of ruthenium and copper in KIO₄-based slurry [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 320:531–537.
- [19] Li J, Liu Y, Wang T, et al. Electrochemical investigation of copper passivation kinetics and its application to low-pressure CMP modeling [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 265:764–770.
- [20] 钱林茂, 田煜, 温诗铸. 纳米摩擦学 [M]. 北京：科学出版社，2013.
- [21] Yu J X, Qian L M, Yu B J, et al. Effect of surface hydrophilicity on the nanofretting behavior of Si(100) in atmosphere and vacuum [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108:034314.
- [22] Yu J X, Kim S H, Yu B J, et al. Role of tribochemistry in nanowear of single-crystalline silicon [J]. *ACS Applied Material & Interfaces*, 2012, 4(3):1585–1593.
- [23] Chen L, He H T, Wang X D, et al. Tribology of Si/SiO₂ in humid air: Transition from severe chemical wear to wearless behavior at nanoscale [J]. *Langmuir*, 2015, 31(1):149–156.

- [24] Yu B J, Dong H S, Qian L M, et al. Friction-induced nanofabrication on monocrystalline silicon [J] . *Nanotechnology*, 2009, 20: 465303.
- [25] Shen M X, Zhu M H, Cai Z B, et al. Dual-rotary fretting wear behavior of 7075 aluminum alloy [J] . *Tribology International*, 2012, 48: 162-171.
- [26] Cai Z B, Zhu M H, Yang S, et al. In situ observations of the real-time wear of PMMA flat against steel ball under torsional fretting [J] . *Wear*, 2011, 271:2242- 2251.
- [27] Shen M X, Zhu M H, Cai Z B, et al. Dual-rotary fretting wear behavior of 7075 aluminum alloy [J] . *Tribology International*, 2012, 48: 162-171.
- [28] Shen M X, Cai Z B, Peng J F, et al. Dual-rotary fretting wear of 7075 alloy in media of oil and water [J] . *Wear*, 2013, 301: 540-550.
- [29] Wang Y F, Guo J M, Gao K X, et al. Understanding the ultra-low friction behavior of hydrogenated fullerene-like carbon films grown with different flow rates of hydrogen gas [J] . *Carbon*, 2014, 77: 518-524.
- [30] Zhou K G, Wang L P, Lu Z B, et al. Tailoring microstructure and phase segregation for low friction carbon-based nanocomposite coatings [J] . *Journal of Material Chemistry*, 2012, 22 (31) , 15782-15792.
- [31] Liu X Q, Yang J, Hao J Y , et al. A near-frictionless and extremely elastic hydrogenated amorphous carbon film with self-assembled dual nanostructure [J] . *Advanced Materials*, 2012, 24 (34) , 4614-4617.
- [32] Ma T B, Wang L F, Hu Y Z, et al. A shear localization mechanism for lubricity of amorphous carbon materials [J] . *Scientific Reports*, 2014, 4: 3662.
- [33] Bao S G, Zhang Y Z, Xing J D, et al. Comparative study on wear behaviors of metal-impregnated carbon material and C/C composite under electrical sliding [J] . *Tribology Transactions*, 2010, 53 (6) :933-938.
- [34] Zhang Y Z, Yang Z H, Song K X, et al. Triboelectric behaviors of materials under high speeds and large currents [J] . *Friction*, 2013, 1 (3) : 259-270.
- [35] Lin X Z, Zhu M H, Mo J L, et al. Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied [J] . *Transactions Nonferrous Materials Society China*, 2011, 21:292-299.
- [36] Li J J, Zhang C H, Luo J B. Superlubricity behavior with phosphoric acid-water network induced by rubbing [J] . *Langmuir*, 2011, 27 (15) : 9413-9417.
- [37] Li J J, Liu Y H, Luo J B. Excellent lubricating behavior of brasienschreberi mucilage [J] . *Langmuir*, 2012, 28(20) : 7797-7802.
- [38] Li J J, Zhang C H, Ma L R, et al. Superlubricity achieved with mixtures of acids and glycerol [J] . *Langmuir* , 2013, 29 (1) : 271-275.
- [39] Ma L R, Gaisinskaya-Kipnis A, Kampf N, Klein J. Origins of hydration lubrication [J] . *Nature Communications*, 6: 6060.
- [40] Guo F, Yang P R, Qu S. On the theory of thermal elastohydrodynamic lubrication at high slide-roll ratios - circular glass-steel contact solution at opposite sliding [J] . *ASME Journal of Tribology*, 2001, 123 (4) : 816-821.
- [41] Fan M J, Song Z H, Liang Y M, et al. In situ formed ionic liquids in synthetic esters for significantly improved lubrication [J] . *ACS Applied Material& Interfaces*, 2012, 4 (12) :6683-6689.
- [42] Song Z H, Liang Y M, Fan M J, et al. Lithium-based ionic liquids functionalized by sym-triazine and cyclotriphosphazene as high temperature lubricants [J] . *Tribology International*, 2014, 70:136-141.
- [43] Cai M R, Liang Y M, Zhou F, et al. Tribological properties of novel imidazolium ionic liquids bearing benzotriazole group as the antiwear/anticorrosion additive in poly (ethylene glycol) and polyurea grease for steel/steel contacts [J] . *ACS Applied Material& Interfaces*, 2011, 3 (12) :4580-4592.
- [44] Song Z H, Cai M R, Liang Y M, et al. In situ preparation of anti-corrosion ionic liquids as the lubricant additives in multiply-alkylated cyclopentanes [J] . *RSC Advances*, 2013, 3 (44) :21715-21721.
- [45] Song Z H, Liang Y M, Fan M J, et al. Ionic liquids from amino acids: fully green fluid lubricants for various surface

- contacts [J]. RSC Advances, 2014, 4 (37) : 19396.
- [46] Fan M J, Song Z H, Liang Y M, et al. Laxative inspired ionic liquid lubricants with good detergency and no corrosion [J] . ACS Applied Material & Interfaces, 2014, 6 (5) : 3233–3241.
- [47] Wang L B, Zhang M, Wang X B, et al. The preparation of CeF₃ nanocluster capped with oleic acid by extraction method and application to lithium grease [J] . Materials Research Bulletin, 2008, 43 (8–9) : 2220–2227.
- [48] Ji X B, Chen Y X, Zhao G Q, et al. Tribological properties of CaCO₃ nanoparticles as an additive in lithium grease [J] . Tribology Letters, 2010, 41 (1) : 113–119.
- [49] Yao Y L, Wang X M, Guo J J, et al. Tribological property of onion-like fullerenes as lubricant additive [J] . Materials Letters, 2008, 62 (16) : 2524–2527.
- [50] Wei J X, Cai M R, Zhou F, et al. Candle soot as particular lubricant additives [J] . Tribology Letters, 2014, 53 (3) : 521–531.
- [51] Chen Z, Liu X W, Liu Y H, et al. Ultrathin MoS₂ nanosheets with superior extreme pressure property as boundary lubricants [J] . Scientific Reports, 2015, 5, DOI: 10.1038/srep12869.
- [52] Fan X Q, Xia Y Q, Wang L P, et al. Study of the conductivity and tribological performance of ionic liquid and lithium greases [J] . Tribology Letters, 2014, 53 (1) : 281–291.
- [53] Fan X Q, Wang L P. Highly conductive ionic liquids toward high-performance space-lubricating greases [J] . ACS Applied Material & Interfaces, 2014, 6 (16) : 14660–14671.
- [54] Yu Q L, Fan M J, Li D M, et al. Thermoreversible gel lubricants through universal supramolecular assembly of a nonionic surfactant in a variety of base lubricating liquids [J] . ACS Applied Material & Interfaces, 2014, 6 (18) : 15783–15794.
- [55] Wang Q H, Zhang X R, Pei X Q. Study on the friction and wear behavior of basalt fabric composites filled with graphite and nano-SiO₂ [J] . Materials and Design, 2010, 31 (3) : 1403–1409.
- [56] Wang Y M, Wang T M, Wang Q H. Effect of molecular weight on tribological properties of thermosetting polyimide under high temperature [J] . Tribology International, 2014, 78:47–59.
- [57] Kong L Q, Zhu S Y, Bi Q L, et al. Friction and wear behavior of self-lubricating ZrO₂ (Y₂O₃) - CaF₂ - Mo - graphite composite from 20° C to 1000° C [J] . Ceramics International, 2014, 40:10787–92.
- [58] Yuan Z G, Yang J F, Wang X P, et al. Characterization and properties of quaternary Mo - Si - C - N coatings synthesized by magnetron sputtering [J] . Surface and Coatings Technology, 2011, 205 (10) : 3307.
- [59] Luo Q S, Wang S C, Zhou Z Z, et al. Structure characterization and tribological study of magnetron sputtered nanocompositenc-TiAlV (N, C) /a-C coatings [J] . Journal of Materials Chemistry, 2011, 21:9746.
- [60] Liu X Q, Yang J, Hao J Y, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of Si and Al co-doped hydrogenated amorphous carbon films deposited at various bias voltages [J] . Surface and Coatings Technology, 2012, 206 (19–20) : 4119–4125.
- [61] 杨丽雯, 张永宏, 房东明. 固体涂层与油脂复合润滑现状及发展趋势 [J] . 现代技术陶瓷, 2014, 4: 39–41.
- [62] Cai M R, Guo R S, Zhou F, et al. Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energy saving and low carbon emission [J] . Science China Technological Sciences, 2013, 56 (12) : 2888–2913.
- [63] Liu X F, Wang L P, Lu Z B, et al. Vacuumtribological performance of DLC-based solid - liquid lubricating coatings: Influence of sliding mating materials [J] . Wear, 2012, 292–293: 124–134.
- [64] Wang L P, Liu X F. Tribological behavior of DLC/IL solid-liquid lubricating coatings in a high-vacuum condition with alternating high and low temperatures [J] . Wear, 2013, 304 (1–2) : 13–19.
- [65] Yuan S H, Huang W, Wang X L. Orientation effects of micro-grooves on sliding surfaces [J] . Tribology International, 2011, 44 (9) : 1047.
- [66] Yan D S, Qu N S, Li H S, et al. Significance of dimple parameters on the friction of sliding surfaces investigated by orthogonal experiments [J] . Tribology Transactions, 2010, 53 (5) : 703–712.

- [67] 梁鹤. 高速下润滑成膜规律与摩擦机理研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [68] 张韶华. 纳米级润滑膜分子排列结构的实验研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [69] Cai Z B, Zhu M H, Yang S, et al. In situ observations of the real-time wear of PMMA flat against steel ball under torsional fretting [J]. *Wear*, 2011, 271: 2242–2251.
- [70] Yang J, Mo J L, Cai Z B, et al. Identification between rotational fretting and rotational wear of PMMA/steel by means of tribo-noise and tribo-vibration signals [J]. *Tribology International*, 2013, 59: 1–9.
- [71] Song C, Shen M X, Lin X Z, et al. An investigation on rotatory bending fretting fatigue damage of railway axles [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2014, 37 (1): 72–84.
- [72] 刘宇宏, 雒建斌. 纳米制造科学与技术中的基础问题研究进展 [J]. *中国基础科学*, 2013, 03:3–13.
- [73] 刘献礼, 刘铭, 何耿煌, 等. 重型切屑过程硬质合金刀片的冲击破损伤行为 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50 (23): 175–185.
- [74] Zhao W J, Wang L P, Xue Q J. Design and fabrication of nanopillar patterned Au textures for improving nanotribological performance [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2010, 2 (3): 788–794.
- [75] 郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2014, 11:119–134.
- [76] 雷阳, 周兆忠, 吕冰海. 蓝宝石基片干式化学机械抛光的研究 [J]. *航空精密制造技术*, 2013, 01: 7–10.
- [77] Chai Z M, Liu Y H, Lu X C, et al. Reducing adhesion force by means of atomic layer deposition of ZnO films with nanoscale surface roughness [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6 (5): 3325–3330.
- [78] 徐滨士. 国内外再制造的新发展及未来趋势 [J]. *机械工程导报*, 2010, (4): 15–19.
- [79] Xing Z G, Wang H D, Zhu L N, et al. Properties of the BaTiO₃ coating prepared by supersonic plasma spraying [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 582: 246–252.
- [80] Xing Z G, Wang H D, Zhu L N, et al. Properties of the BaTiO₃ coating prepared by supersonic plasma spraying [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 582: 246–252.
- [81] 宁李谱, 孟祥慧, 谢友柏. 基于无线传输的内燃机活塞组 – 缸套摩擦力测量方法 [J]. *上海交通大学学报*, 2014, 48 (9): 1297–1301.
- [82] 徐新泉, 刘伟, 刘焜. 湿滑路面上固体颗粒对轮胎附着性能的影响 [J]. *合肥工业大学学报 (自然科学版)*, 2012, 35 (2): 149–152.
- [83] 王延忠, 周元子, 陈聪慧, 等. 弹流润滑螺旋锥齿轮热摩擦行为分析 [J]. *航空动力学报*, 2011, 26 (10): 2382–2387.
- [84] Zhao X, Wen Z F, Zhu, M H, et al. A study on high-speed rolling contact between a driving wheel and a contaminated rail [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52 (10): 1270–1287.
- [85] Yang H J, Hu Y, Chen G X, et al. Correlation between the wear and vibration of the contact strip in a contact wire rubbing against a contact strip with electrical current [J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57, 86–93.
- [86] Peng J F, Song C, Shen M X, et al. An experimental study on bending fretting fatigue characteristics of 316L austenitic stainless steel [J]. *Tribology International*, 2011, 44 (10): 1417–1426.
- [87] Xu S S, Gao X M, Sun J Y, et al. Comparative study of moisture corrosion to WS₂ and WS₂/Cu multilayer films [J]. *Surface and Coatings Technology*. 247 (2014) 30–38.
- [88] Liu X Q, Yang J, Hao J Y. A near-frictionless and extremely elastic hydrogenated amorphous carbon film with self-assembled dual-nanostructure [J]. *Advanced Materials*, 2012, 34: 4614.
- [89] Wang Y, Guo J, Gao K. Understanding the ultra-low friction behavior of hydrogenated fullerene-like carbon films grown with different flow rates of hydrogen gas [J]. *Carbon*, 2014, 77: 518–524.
- [90] Lv M, Zheng F, Wang Q H. Effect of proton irradiation on the friction and wear properties of polyimide [J]. *Wear*, 2014, 316:30 – 36.
- [91] Zhang H J, Zhang Z Z, Guo F. Tribological behaviors of hybrid PTFE/Nomex fabric/phenolic composite reinforced with multi-walled carbon nanotubes [J]. *Materials Science and Engineering A, Journal of Applied Polymer Sci-*

- ence, 2012, 124:235-241.
- [92] 刘文生, 张德坤, 刘洪涛. 采煤机滑靴等离子熔覆高铬铁基合金的摩擦学性能 [J]. 润滑与密封, 2012, 251 (7): 38-40.
- [93] Liu H T, Wang L P, Ge S R, et al. The optimization design research of sliding boots materials with plasma cladding Cr₄MnTi of the shearer [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21:877-880.
- [94] 王家骏, 邹德永, 杨光, 等. PDC 切削齿与岩石相互作用模型 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38: 104-109.
- [95] 孙浩玉, 温林荣, 李德庆. 小井眼水力压耗计算探讨 [J]. 石油机械, 2011, 39, 49-52.
- [96] 林浩平, 郑梅, 李春元, 等. 聚晶金刚石复合体的发展现状与展望 [J]. 超硬材料工程, 2013, 25:37-41.
- [97] 董从林, 白秀琴, 严新平, 等. 海洋环境下的材料摩擦学研究进展与展望 [J]. 摩擦学学报, 2013 33: 311-320.
- [98] 赵星宇, 刘莹, 黄伟峰, 等. 核主泵静压型轴封系统二级密封机理研究 [J]. 摩擦学学报, 2014, 34 (4): 459-467.
- [99] 马金国, 魏伟, 王良. 风电齿轮箱润滑油静态油量与动态油位变化实验研究 [J]. 润滑与密封, 2013, 38 (12): 105-109.
- [100] 刘鹏, 袁成清, 郭智威. 缸套微观形貌对缸套-活塞环振动及润滑性能的影响 [J]. 兵工学报, 2012, 33 (2): 149-154.
- [101] 秦红玲, 周新聪, 闫志敏, 等. 尾轴承橡胶层厚度和硬度及其交互作用对摩擦性能的影响 [J]. 兵工学报, 2013, 34 (3): 318-323.
- [102] Dong C L, Yuan C Q, Bai X Q, et al. Study on wear behaviour and wear model of nitrile butadiene rubber under water lubricated conditions [J]. RSC Advances, 2014, 4: 19034-19042.
- [103] Bai X Q, Xie G T, Fan H, et al. Study on biomimetic preparation of shell surface microstructure for ship antifouling [J]. Wear, 2013, 306:285-295.
- [104] 白秀琴, 袁成清, 严新平, 等. 基于贝壳表面形貌仿生的船舶绿色防污研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (1): 75-78.
- [105] Yan Y. Bio-tribocorrosion in biomaterials and medical implants [M]. Amsterdam :Elsevier, 2013.
- [106] Zhou Z R, Yu H Y, Zheng J, et al. Tribological behavior behavior of dental dental restorative restorative materials materials [M]. Dental Biotribology. New York :Springer, 2013: 141-153.
- [107] Chen K, Zhang D, Cui X, et al. Preparation of ultrahigh-molecular-weight polyethylene grafted with polyvinyl alcohol hydrogel as an artificial joint [J]. RSC Advances, 2015, 5 (31): 24215-24223.
- [108] Li W, Pang Q, Jiang Y, et al. Study of physiological parameters and comfort sensations during friction contacts of the human skin [J]. Tribology Letters, 2012, 48 (3): 293-304.
- [109] 任露泉, 梁云虹. 生物耦合生成机制 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41 (5): 1348-1357.
- [110] 周峰, 王晓波, 刘维民. 纳米润滑材料与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [111] Zhang J, Chen P, Yuan B, et al. Real-space identification of intermolecular bonding with atomic force microscopy [J]. Science, 2013, 342 (6158): 611-614.
- [112] Günter G, Schempp H, Robert-de-Saint-Vincent M, et al. Observing the dynamics of dipole-mediated energy transport by interaction-enhanced imaging [J]. Science, 2013, 342 (6161): 954-956.
- [113] Lee C G, Li Q Y, Kal W, et al. Frictional characteristics of atomically thin sheets [J]. Science, 2010, 328: 76-80.
- [114] Svetlizky I, Fineberg J. Classical shear cracks drive the onset of dry frictional motion [J]. Nature, 2014, 509: 205-208.
- [115] Passel è gue F X, Schubnel A, Nielsen S, et al. From sub-rayleigh to supershear ruptures during stick-slip experiments on crustal rocks [J]. Science, 2013, 340: 1208-1211.

- [116] Jacobs T D B, Carpick R W. Nanoscale wear as a stress-assisted chemical reaction [J] . Nature Nanotechnology, 2013, 8: 108–112.
- [117] Lantz M A, Wiesmann D, Gotsmann B. Dynamic superlubricity and the elimination of wear on the nanoscale [J] . Nature Nanotechnology, 2009, 4: 586–591.
- [118] Bhaskaran H, Gotsmann B, Sebastian A, et al. Ultralow nanoscale wear through atom-by-atom attrition in silicon-containing diamond-like carbon [J] . Nature Nanotechnology, 2010, 5: 181–185.
- [119] Vahdat V, Grierson D S, Turner K T, et al. Mechanics of interaction and atomic-scale wear of amplitude modulation atomic force microscopy probes [J] . ACS Nano, 2013, 7: 3221–3235.
- [120] Briscoe B J, Chateauminois A. Measurements of friction-induced surface strains in a steel/polymer contact [J] . Tribology International, 2002, 35 (4) : 245–254.
- [121] Chateauminois A, Briscoe B J. Nano-rheological properties of polymeric third bodies generated within fretting contacts [J] . Surface and Coatings Technology, 2003, 163–164: 435–443.
- [122] Ding T, Chen G X, Wang X, et al. Friction and wear behavior of pure carbon strip sliding against copper contact wire under AC passage at high speeds [J] . Tribology International, 2011, 44 (4) : 437–444.
- [123] Nicolas A, Gregory S W. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density [J] . Wear, 2012, 274–275: 229–237.
- [124] Lin X Z, Zhu M H, Mo J L, et al. Tribological and electric-arc behaviors of carbon/copper pair during sliding friction process with electric current applied [J] . Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2011, 21 (2) : 292–299.
- [125] Xiao Q D, Lv Z L. Current carrying friction and wear characteristics of Ti-3AlC₂-by novel method of infiltration-sintering [J] . Advances in Applied Ceramics, 2012, 111 (4) : 202–207.
- [126] Sanchez-Lopez J C, Erdemir A, Donnet C, et al. Friction-induced structural transformations of diamondlike carbon coatings under various atmospheres [J] . Surface and Coatings Technology, 2003, 163: 444–450.
- [127] Eryilmaz O L, Erdemir A. On the hydrogen lubrication mechanism(s) of DLC films: An imaging TOF-SIMS study [J] . Surface and Coatings Technology, 2008, 203 (5–7) : 750–755.
- [128] Ponjavic A, Chennaoui M, Wong J S S. Through-thickness velocity profile measurements in an elastohydrodynamic contact [J] . Tribology Letters, 2013, 50: 261–277.
- [129] Qu J, Bansal D G, Yu B, et al. Antiwear performance and mechanism of an oil-miscible ionic liquid as a lubricant additive [J] . ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4: 997–1002.
- [130] Taher M, Shah F U, Filippov A, et al. Halogen-free pyrrolidinium bis (mandelato) borate ionic liquids: some physicochemical properties and lubrication performance as additives to polyethylene glycol [J] . RSC Advances, 2014, 4: 30617–30623.
- [131] Gosvami N N, Bares J A, Mangolini F, et al. Mechanisms of antiwear tribofilm growth revealed in situ by single-asperity sliding contacts [J] . Science, 2015, 348: 102–106.
- [132] Berman D, Deshmukh S A, Sankaranarayanan S K R S, et al. Extraordinary macroscale wear resistance of one atom thick graphene layer [J] . Advanced Functional Materials, 2014, 24, 6640–6646.
- [133] Scharf T W, Rajendran A, Banerjee R, et al. Structure and friction behavior of titanium doped tungsten disulphide (Ti-WS₂) nanocomposite thin films [J] . Thin Solid Films, 2009, 517 (19) : 5666–5675.

撰稿人： 雒建斌 刘维民 王国彪 李健 钱林茂 周峰 田煜 王海斗
张俊彦 朱旻昊 王晓波 袁成清 张德坤